
Diseño y optimización de la estructura portante del cerramiento delantero para un hangar inflable

Treball realitzat per:

Iñigo Pérez de Ituarte

Dirigit per:

Jose Manuel González López

Grau en:

Enginyeria d'obres públiques

Barcelona, 14 de Juny de 2019

Departament d'enginyeria civil i ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	ANTECEDENTES	5
2.1.	Descripción del cerramiento actual	5
2.1.1.	Diseño actual	5
2.1.2.	Definición de las acciones	7
2.2.	Operación de apertura y cierre	10
2.3.	Limitaciones del diseño actual	15
3.	METODOLOGÍA DE DISEÑO	16
3.1.	Requisitos del nuevo diseño.....	16
3.2.	Aproximación estructural.....	17
3.3.	Simulación numérica	17
4.	PROCESO DE DISEÑO ESTRUCTURAL.....	19
4.1.	Modelo 1. Cables conectados al mástil superior	19
4.2.	Modelo 2. Cables anclados a un 70% de la longitud del mástil	23
4.3.	Modelo 3. Cables arriba y abajo.....	28
4.4.	Modelo 4. Doble cable + vigas transversales a la dirección del viento.....	31
4.5.	Modelo 5. Apoyos intermedios y ménsula en voladizo	36
4.6.	Resumen.....	40
5.	SOLUCIÓN FINAL	41
5.1.	Definición geométrica. Configuración estructural	41
5.2.	Definición del modelo numérico	47
5.3.	Análisis estructural	50
5.3.1.	Análisis mástil	50
5.3.2.	Análisis carro (base)	52
5.3.3.	Análisis en los cables	53
5.3.4.	Análisis de las membranas	55
5.3.5.	Desplazamientos	56
5.3.6.	Reacciones.....	57
5.4.	Estudio de estabilidad	58
5.4.1.	Análisis del riesgo de deslizamiento.....	59
5.4.2.	Análisis de estabilidad al vuelco.....	59
5.4.3.	Análisis de estabilidad al deslizamiento.....	60
5.5.	Sistemas de reducción de exposición al viento.....	61
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	63
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Buildair® es una empresa dedicada a la construcción de estructuras, especialmente, hangares cuya peculiaridad principal consiste que, a diferencia de un hangar normal, la estructura resistente no está compuesta de hormigón, ni metal, sino que consiste en una estructura en forma de arco, cuyo elemento resistente es el aire a gran presión siendo así una estructura hinchable. La principal ventaja de este tipo de estructuras es su implementación rápida y sencilla, y fácilmente adaptable a estructuras de carácter temporal. En estos hangares se pueden desarrollar múltiples actividades, con especial incidencia en lo que respecta al estacionamiento y mantenimiento de aeronaves.

A pesar de que todos los hangares hechos siguen un modelo estándar, cada hangar es diferente y tiene sus propias características. Buildair® ha firmado múltiples contratos para la construcción de hangares hinchables en aeropuertos como Madrid Budapest, Varsovia, Riad o Jeddah, con condiciones climáticas y geotécnicas diferentes haciendo que cada encargo es único con las especificaciones o requerimientos que sean necesarios para el uso que el cliente quiera hacer de éste.

Estos hangares en líneas generales consisten en una sucesión de grandes tubos hinchables, de tela de PVC de una gran resistencia a las grandes presiones internas a la que se someten estos tubos a lo largo de su vida útil. Gracias a la concatenación de dichos tubos se forma una cubierta en forma elíptica que garantiza los estándares de habitabilidad y confort para el desarrollo de las actividades consideradas. La estructura, además, consta de dos grandes cerramientos en la parte trasera y delantera, que están constituidos por una gran puerta, en su mayoría hinchable.

La apertura de la puerta reviste una gran importancia en su diseño por ser una característica fundamental en la operatividad del cerramiento. Dicha operación constituye un momento crítico por lo que respecta a la estabilidad, al deslizamiento y el vuelco, este aspecto es fundamental para la competitividad del producto, siendo el tiempo que se requiere para abrir la puerta uno de los factores principales, así como las velocidades de viento máximas para que esta operación sea segura.

El objetivo de este trabajo es el diseño para la optimización del cerramiento delantero partiendo de las limitaciones constatadas en la solución actual. Los requerimientos para este diseño vienen dados por la estabilidad estructural y el tiempo de apertura y cierre de la puerta, asociado a la facilidad del proceso.

El modelo de puerta que se tiene construido actualmente, muestra ciertas limitaciones en cuanto a operatividad respecta y por tanto da lugar a un gran margen de mejora, ya sea en relación con el peso de esta, así como en la facilidad del proceso, el tener que quitar cables anclados al suelo lo cual ralentiza el proceso de apertura y cierre de la puerta.

En este proyecto se presentan los desarrollos realizados para la optimización de la puerta delantera de un hangar hinchable.

Esquema del documento:

En primer lugar se tiene como antecedentes el modelo actual de la puerta con un ejemplo de un hangar en específico de 75m de ancho (H75)

En segundo lugar la metodología de diseño que consiste en los parámetros sobre los cuales se diseñara la nueva puerta

En tercer lugar los resultados obtenidos explican el proceso que se ha tomado para llegar al resultado final.

En cuarto lugar se describe la solución final adoptada entendida como la configuración óptima para los condicionantes establecidos.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y se formulan algunas líneas de investigación futura.

2. ANTECEDENTES

2.1. Descripción del cerramiento actual

2.1.1. Diseño actual

El diseño actual consiste en una puerta cuyas dimensiones dependen de la geometría del tronco del hangar.

La puerta está dividida en varias unidades, formadas por carros con mástiles sobre los que se sujetan los tubos hinchables. Estos tubos están conectados a una bomba de aire que constantemente están hinchando el tubo. Estos tubos presentan una notable rigidez gracias a la gran presión interna a la que están sometidos.

Por lo que respecta al cerramiento global de la puerta, está constituida por secciones tal como se ha podido ver en la Figura 2, de distintos tamaños y alturas, siendo más grandes en los tramos centrales y más escuetos en las secciones laterales. Se puede observar esta disposición en la Figura 1.

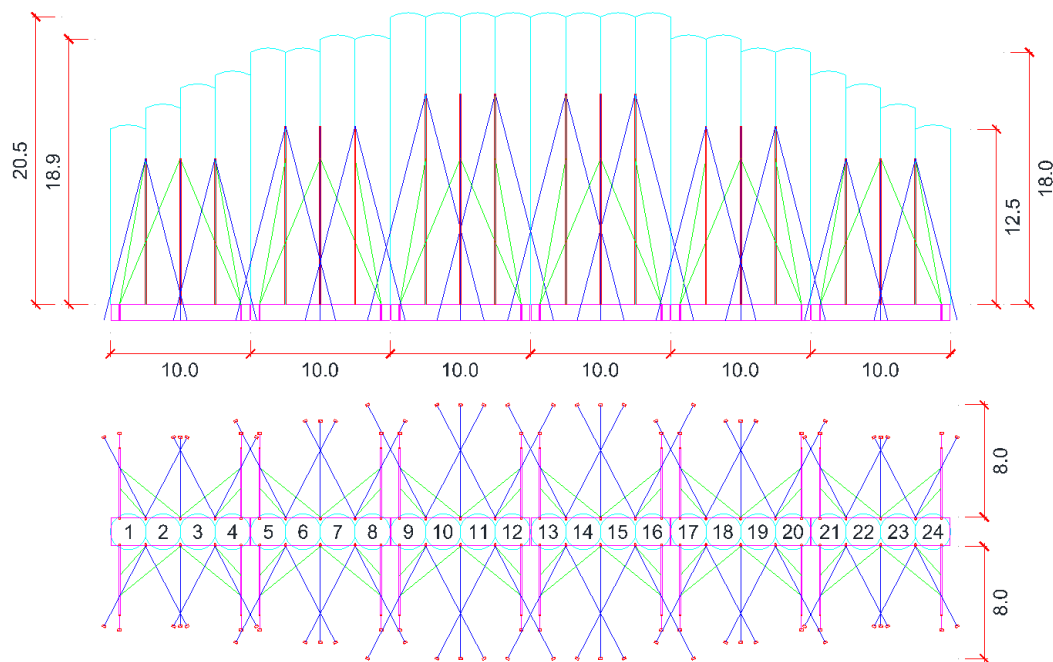


Figura 1. Disposición hangar inicial

Se puede observar en la Figura 2, la disposición de un solo carro individual con los elementos estructurales referidos anteriormente.

Desde el punto de vista estructural el cerramiento delantero incluye diversas unidades estructurales acorde con la función desarrollada en la estabilidad del hangar y de los elementos resistentes empleados. A continuación se enumeran dichas unidades estructurales:

1. *Tubos hinchados.*
2. *La red de cintas que envuelven los tubos asegurando así la estabilidad.*
3. *Las vigas verticales o mástiles.*
4. *Cables.*
5. *las vigas que componen el carro.*
6. *Dispositivos de apoyos y anclajes.*

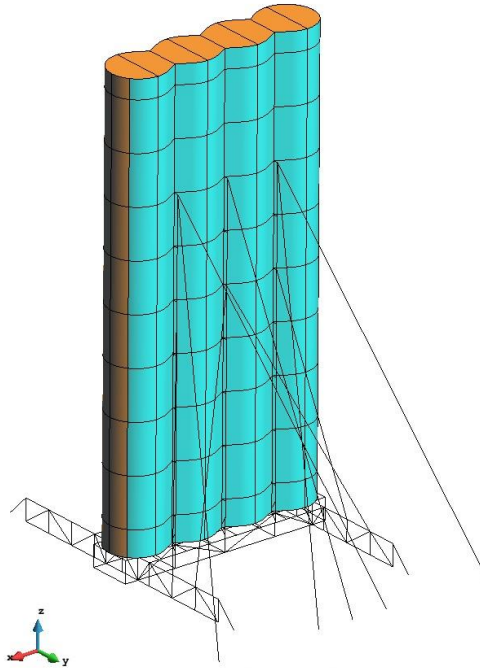


Figura 2. Geometría de la puerta actual

Por lo que hace a los **tubos** se tienen unos tubos de diámetro 2,57 m hinchados, constituidos por una tela de PVC de alta resistencia capaz de soportar 100 milibares de presión interna.

Por lo que hace a las **cintas** se pueden subdividir las en 3 tipos:

1. “**espinas**”: se disponen en la generatriz vertical del tubo para soportar las fuerzas de doblado.
2. **Abrazos**: Dispuestas en la sección normal al eje del tubo. Su función es para soportar las fuerzas que se generan debido a la presión en el propio tubo.
3. **Cruces y radiales**: Situadas en el plano vertical entre dos tubos. Su principal función es la de rigidizar la estructura en dicho plano

Por otra parte, en el **carro** como tal, es la parte sobre la cual se soporta mástil y los tubos. Desde el punto de vista estructural, se puede dividir el carro en dos como se ve en la Figura 3:

1. **Cuerpo**, en el cual se encuentran las tensiones máximas en las vigas transversales juntándose con los mástiles. Puesto que en esta parte se encuentran las tensiones máximas, en esta sección transversal, se pondrá las secciones más gruesas.

2. Patas, en esta sección los esfuerzos son mucho menores, y por tanto permite poner secciones más pequeñas.

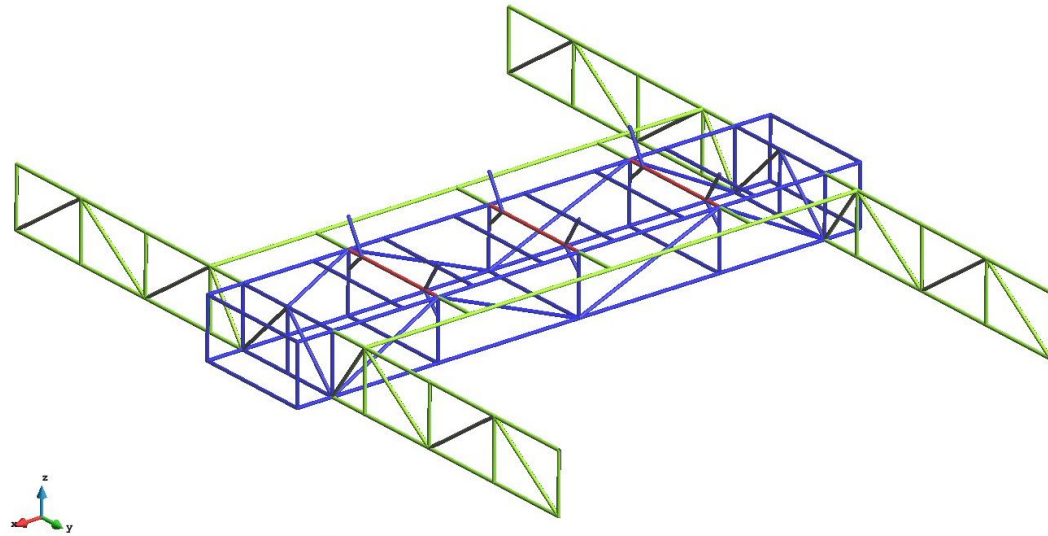


Figura 3. Geometría del carro actual

Los **cables** se pueden dividir dependiendo de la localización y tipo de anclajes.

- Cables del mástil al suelo: los cables están con una orientación de 45° en cada sentido, respecto al plano vertical.
- Cables de los mástiles a los carros: anclados de los mástiles a las patas.
- Cables del carro al suelo: también con un ángulo de 45° desde las patas al suelo.

Cabe decir que cada cable tiene un tensor y su correspondiente anclaje. El set cable-tensor-grilletes es igual en el interior debido a una posible presión de succión. Por otra parte, hay que puntualizar que los cables están anclados a tierra a través de placas.

2.1.2. Definición de las acciones

El **peso propio** de la estructura se ha obtenido de los componentes individuales que están involucrados en la puerta. Además, la altura de los tubos es de 20.5 m, de lo cual se puede tomar los valores que se nos presentan en la Tabla 1.

Material		Peso propio (kg/m ³)
Ítem	especificaciones	
Membrana	Ferrari 702 S2	1498
correas	300 mm	683
	90 mm	780
	50 mm	849
Mástiles / carros	Secciones tubulares	7839
Cables	$\phi 20$	7839

Tabla 1. Pesos específicos de los materiales de la puerta actual

Con estos valores el peso total de la estructura es de unas 7 toneladas de peso para el carro más grande (centrales) tal como se ha podido ver en la Figura 1.

Por otra parte la acción del **viento** es sumamente importante, y la principal acción que afecta a la puerta delantera.

Para el cálculo de la acción que incide sobre la puerta se toma como referencia las acciones incidentes sobre la puerta H75 con un viento de **86 Km/h**.

La velocidad de viento básica consiste en la velocidad de viento medida durante 10 minutos con independencia de la dirección de este y la época del año a 10 metros del suelo. Este es un valor aproximado hallado por probabilidad. Esta probabilidad tiene un periodo de retorno de 50 años.

La velocidad del viento se calcula como:

$$V_d = V_{d0} c_{dir} c_{sea}$$

Dónde:

- c_{dir} depende de la dirección del viento aunque la norma recomienda que sea 1.
- c_{sea} es el coeficiente con el que varía el viento a lo largo del año siendo el recomendado por la normativa de uno.

Por lo que respecta a la determinación de la velocidad media y la turbulencia, depende básicamente de la orografía y de la rugosidad, y se calcula con la siguiente expresión:

$$V_m = V_d c_r(z) c_0(z)$$

Donde los coeficientes involucrados son:

- $c_0(z)$ es un coeficiente relativo a la topografía cuyo valor recomendado es de 1.
- $c_r(z)$ es un valor que depende de la rugosidad.

$c_0(z)$ se calcula como:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1,375$$

Donde

- k_r es un coeficiente relacionado con el suelo.
- Z es la altura máxima del hangar
- Z_0 con un valor de 0,01
- $k_r = 0.19 \ln\left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} = 0.170$

Las turbulencias se calculan como una variación del coeficiente que depende de la velocidad del viento (v) en relación a la derivación estándar del valor medio. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_v = k_r k_1 V_b$$

Donde k_1 es un coeficiente de turbulencia de valor 1

Finalmente el coeficiente se calcula como:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{V_m} = \frac{k_1}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0,1234$$

El coeficiente de turbulencia se calcula como:

$$C_e(z) = 1 + 7I_v = 1,864$$

Para la determinación de la presión producida por el pico de la velocidad de viento se calcula como:

$$q_z(z) = C_e(z) q_b$$

Donde $C_e(z)$ es un coeficiente que depende de la altura y q_b es el equivalente de la presión estática básica correspondiente a la velocidad media y se calcula como:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho (v_m)^2$$

Donde la densidad del aire es de $1,25 \text{ kg/m}^3$.

La presión estática equivalente se calcula como:

$$q_z(z) = C_e(z) q_b = (1 + 7I_v) \frac{1}{2} \rho (v_m)^2$$

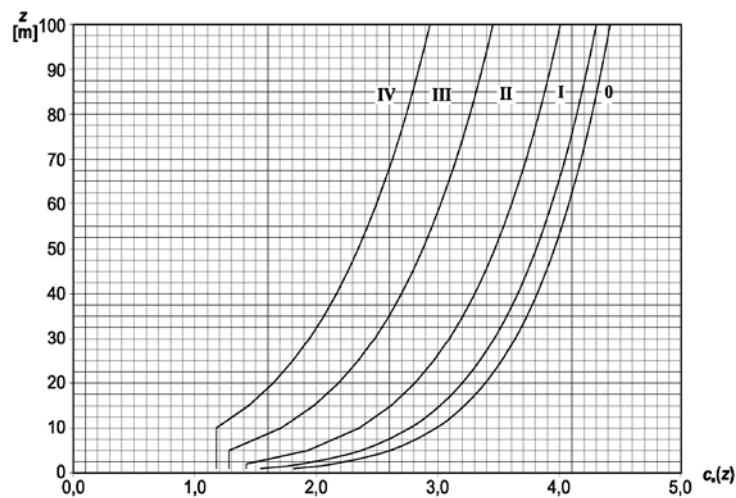


Figura 4. Coeficiente C_e en función de la altura

La distribución de las presiones en la Puerta frontal dependerá de los parámetros geométricos tales que:

- d es la anchura de la estructura. En el caso del H75 $d = 90 \text{ m}$.

- l es la anchura lateral. H75, $h = 914,61\text{m}$.
- f es la altura de la estructura; H75 $\rightarrow h = 33\text{m}$.

Por otra parte la presión que se genera sobre la puerta se calcula como;

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe}$$

Donde $q_p(z_e)$ es la presión correspondiente al pico correspondiente a la velocidad obtenida, y c_{pe} es el coeficiente para la presión externa.

Con la expresión de la presión se saca la presión que actúa sobre la puerta frontal que es de **937Mpa**.

2.2. Operación de apertura y cierre

La operación de apertura y cierre puede llegar a durar alrededor de unas 4 horas en las que constan unas acciones previas y posteriores a las operaciones de apertura y cierre como tal, constituidos por las acciones de des anclaje y anclaje de cables.

Por lo que respecta al proceso de apertura, una vez desanclados los cables, y se procede al movimiento de las puertas, el mecanismo de apertura será llevado a cabo por toros, cuyo peso se debe tener en cuenta para el posterior estudio de la estabilidad.

Como se ha especificado anteriormente el principal problema es el tiempo de apertura de la puerta. Actualmente la puerta tiene muchos anclajes al suelo como se ha podido ver en la Figura 2 y la Figura 1.

En cualquier caso, actualmente la puerta solo se puede abrir si se cumplen los siguientes requisitos para que la operación se desarrolle con plena seguridad en todo momento:

La operación debe llevarla a cabo operadores con un buen conocimiento del manual de operaciones proporcionado por Buildair®. Es necesario que la operación sea llevada a cabo por personal que esté familiarizado con el tema para que en todo momento prevalezca la seguridad.

Además, la velocidad máxima a la que se pueden iniciar las operaciones es de 25 km/h, puesto que, sino no se puede asegurar la estabilidad al deslizamiento principalmente, haciendo que el toro junto con el carro se desplace libremente lo cual supone una situación bastante peligrosa.

Por último, el periodo de cerrado debe ser lo más rápido posible, las operaciones de apertura y cerrado deben ser previamente planificadas. En caso contrario un cambio en las condiciones climáticas podría suponer un grave peligro para los operadores.

Las operaciones de apertura y cierre ya constituyen dos fases separadas una inversa de la otra. A su vez cada una de estas fases se divide en otras 5 fases como se verá posteriormente.

Cada una de estas fases se repetirá para por cada par de carros o secciones como ha sido indicado en el apartado 2.1.2.

Este proceso supone el momento más crítico para la estabilidad de la estructura por lo que los requerimientos expresados anteriormente. Como se especificará más adelante la estabilidad viene asociada a unas velocidades de viento máximas asociadas a su vez a la superficie de exposición al viento. Se ha de tener en cuenta en el modelo actual que la superficie de exposición es el doble puesto que se llevan dos carros en cada movimiento lo cual supone un gran incremento de la superficie de exposición y una disminución importante en lo que respecta a las velocidades máximas de viento para las operaciones.

Fases de la apertura y cierre:

1. En primer lugar, se abrirá tras asegurar las condiciones del viento, en la Figura 5 se puede observar la disposición inicial de la parte frontal de las puertas.

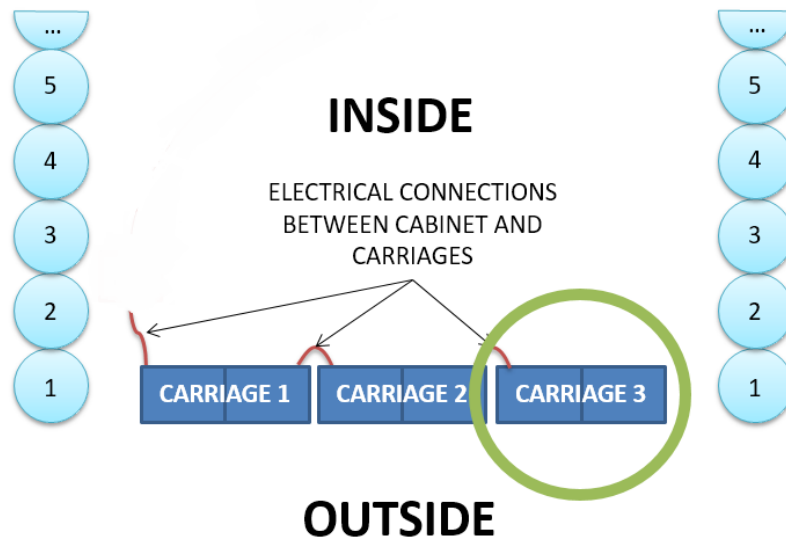


Figura 5. Posición inicial puerta

Es importante en esta fase desconectar los cables de la electricidad que conectan entre otras cosas, los motores que hinchan los tubos.

11. Disconnect electrical connection between CARRIAGE 2 and CARRIAGE 3

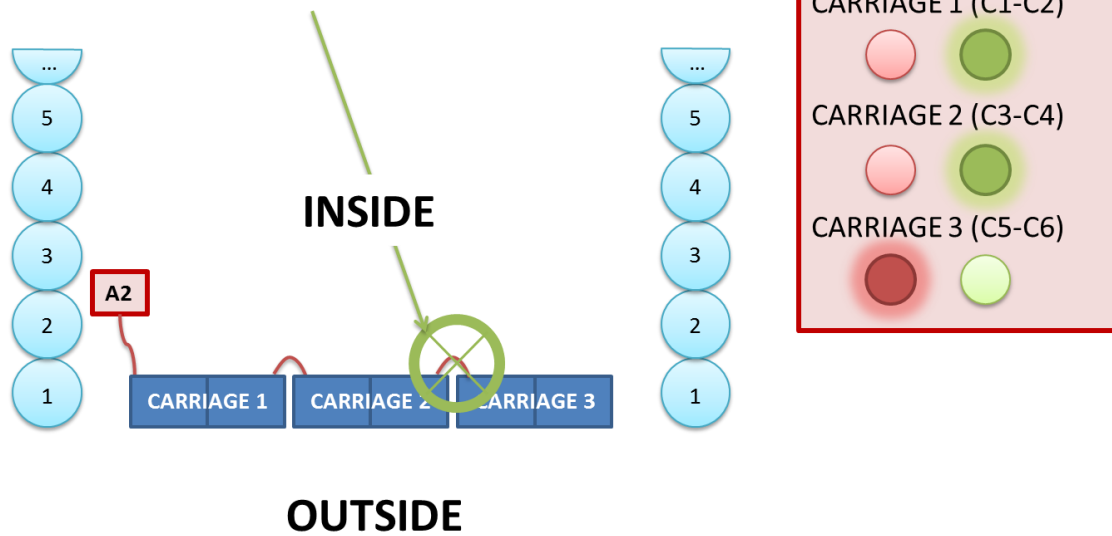


Figura 6. Posición inicial puerta (cables de electricidad)

- En segundo lugar, se procederá a subir las patas (apoyos) del tercer carro, dejando que el carro se apoye sobre las ruedas. Simultáneamente se procederá al desinflado de los tubos. (Figura 7)

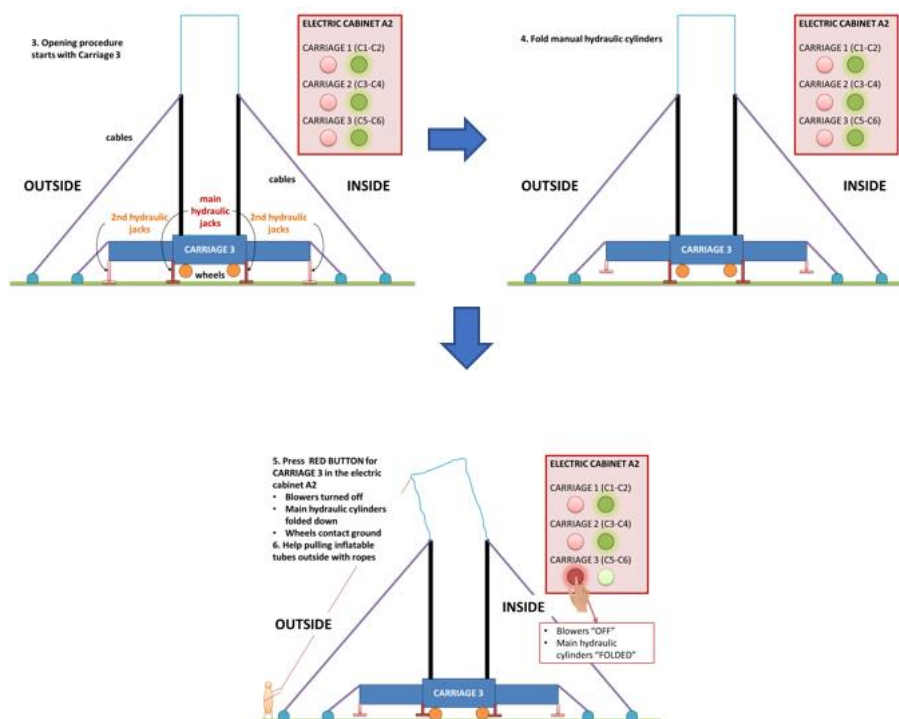


Figura 7. Primera fase apertura puerta

El proceso de deshinchado tiene una duración de entre 15-20 min. Este proceso se hace por cada tubo individualmente (uno detrás de otro). (Figura 8)



Figura 8. Deshinchado de la puerta

3. Una vez se ha deshinchado los tubos se procede a conectar el toro con el carro, previamente a desconectar los cables que unen el carro con el suelo.(Figura 9/Figura 10)

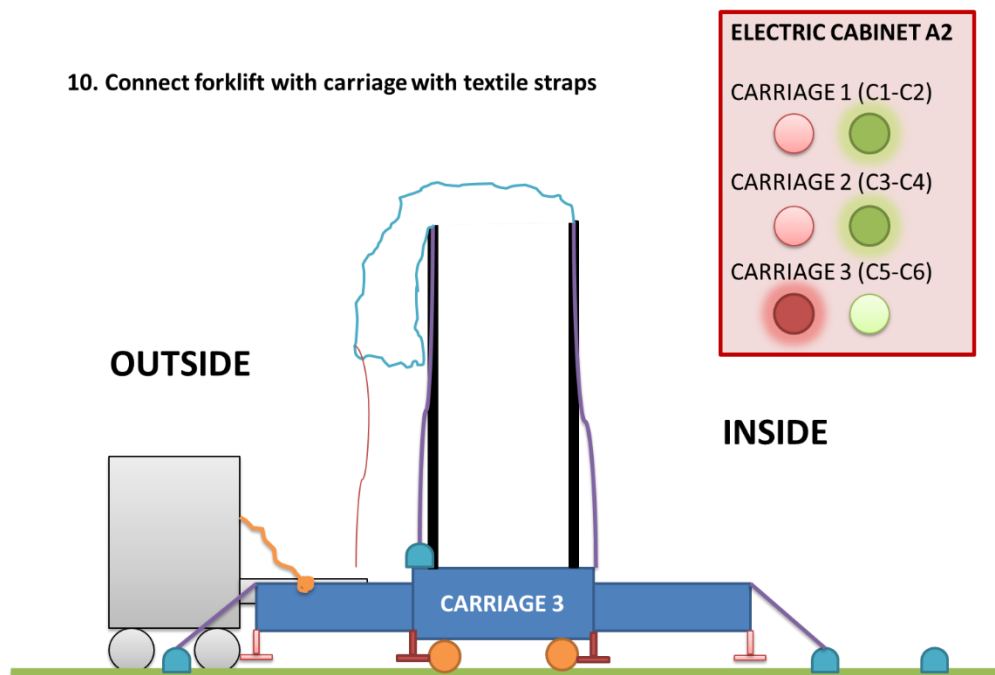


Figura 9. Deshinchados cables conectados

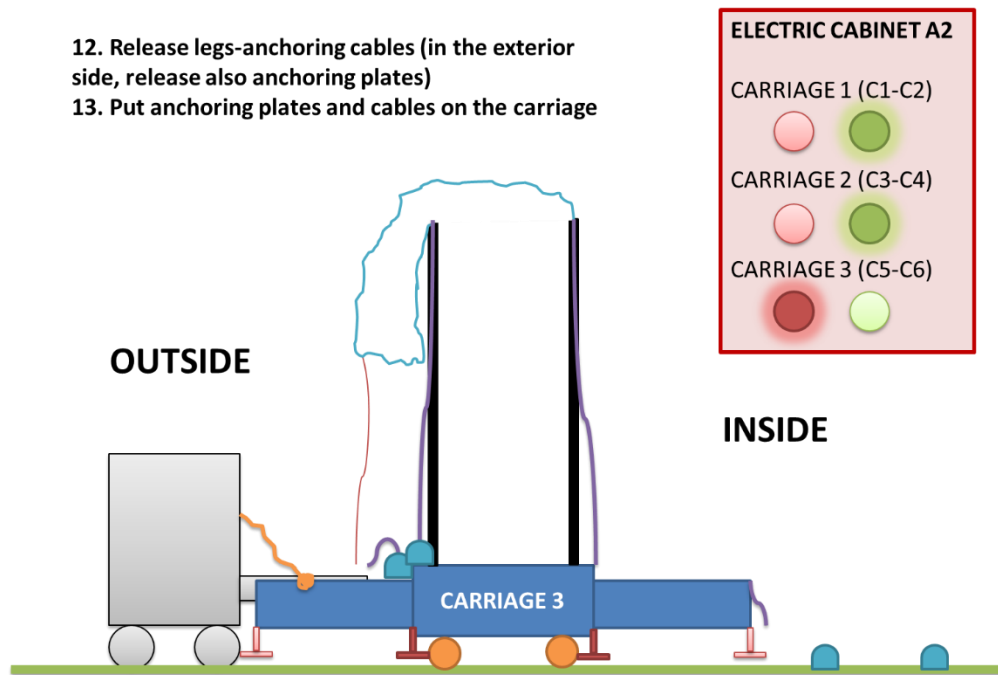


Figura 10. Tubos deshinchados con cables desconectados al suelo

El transporte solo puede ser operado por un toro de peso igual o superior a 5 toneladas. El toro tira del carro, no lo empuja como se ve en la Figura 11.



Figura 11. Transporte carro

4. El procedimiento anteriormente explicado se repite para los otros dos pares de carros restantes; una vez hecho esto último se retiran los carros tal como se indica en la Figura 12.
5. Una vez abierta la puerta cada carro se ancla al suelo individualmente, esta última disposición es estable hasta los 40 km/h.

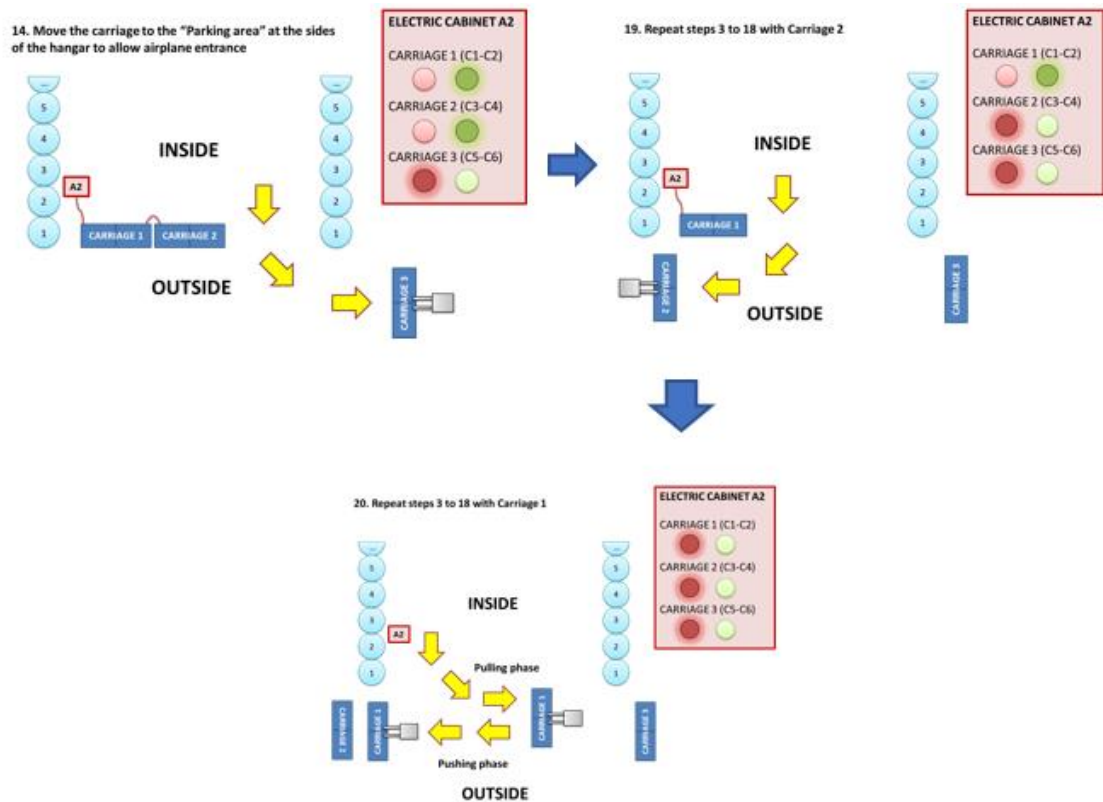


Figura 12. Transporte y disposición de los carros con la puerta abierta

- Finalmente, el cerrado de la puerta, una vez la aeronave ha entrado o salido del hangar se procede inversamente a los pasos especificados anteriormente asimismo siendo la velocidad de viento inferior a 25km/h, empezando por el desanclado de los cables que se anclan al carro una vez abierta la puerta.

2.3. Limitaciones del diseño actual

La experiencia del montaje y el uso de la estructura de la actual puerta en los hangares en funcionamiento muestran algunas limitaciones en cuanto a la operatividad se refiere.

Actualmente el principal problema de la puerta es su tiempo de apertura. El proceso necesita de trabajadores cualificados además de un gran número de ellos.

Otro factor que afecta al tiempo de la operación es el desanclado de los cables a la losa. Este proceso se ha de hacer uno por uno haciendo que se pierda mucho tiempo.

Además la puerta tiene un peso elevado haciendo que los toros que tiran del carro deban ser de gran potencia y peso, lo cual encarece las operaciones de apertura.

Durante la fase de apertura y cierre el carro es arrastrado lo cual hace más lentas las maniobras.

Por otra parte esta es la velocidad de viento máxima a la que se puede proceder a la operación, haciendo que las operaciones estén muy limitadas por el factor climático.

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

3.1. Requisitos del nuevo diseño

Se afronta el diseño de la nueva puerta que subsane las deficiencias que de la estructura actual o que mejore las prestaciones ofrecidas por la misma. Para ello se consideran algunos requisitos que guían el proceso de diseño estructural de la nueva puerta, los cuales se pueden resumir en:

En primer lugar, el **transporte y pre-montaje**. La fabricación de la estructura metálica está producida en España y posteriormente se procede al transporte de esta en contenedores de 2x2x12 m. El diseño tiene en cuenta las condiciones del posible transporte de la estructura, debido a lo cual se plantea una estructura modular que permita almacenar la estructura por partes optimizando así su almacenaje y transporte. En este punto se le pide también al diseño en la medida de lo posible ser lo óptimo para su transporte evitando que las secciones de la estructura sobrepasen los valores máximos del contenedor, y a su vez completen la mayor parte de éste para que el transporte sea lo más económico posible. Hay que puntualizar que la estructura se lleva por partes y se suelda en el lugar de montaje.

En relación con el punto anterior, debe intentar en la medida de lo posible llevar la estructura lo menos fraccionada posible, para que una vez en su lugar de montaje final se suelde lo mínimo posible. Es decir, se debe llevar lo menos fraccionada posible, pero sin transportar aire habiendo así un compromiso entre el transporte modular y el montaje.

Por otra parte, se tiene en cuenta la **movilidad del toro**: como se ha especificado previamente, el sistema de apertura es llevado a cabo con unos toros con un peso mínimo que asegure las conducciones de estabilidad del carro. Para una mejor movilidad de este lo mejor es que el peso a movilizar sea el mínimo posible. Así pues, se requiere de este nuevo diseño que el peso sea inferior al de la puerta actual que está en unas 7 toneladas. Además se deberá comprobar la estabilidad de este intentando mejorar las velocidades a las que se puede abrir la puerta, sin que se doble la estructura, y procurando la reducción del peso del toro, para economizar en el vehículo y proceder esta operación con un toro de menor potencia, pero más económico.

También debido a que se deberá evitar, en la medida de lo posible, **dañar la losa** habrá que diseñar un sistema de ruedas, patines u otros sistemas, en la puerta para proceder a su apertura.

Otro aspecto importante que revisar son los **tejidos o tubos**: para facilitar las operaciones de deshinchado y mejorar las velocidades de apertura se requiere de un sistema que pueda evitar una exposición al viento. Para ello se plantea la posibilidad de utilizar lentejas infladas o por facilidad constructiva membranas.

Entre los factores más importantes está la operatividad requerida por el cliente en términos de tiempo y facilidad de operación para la apertura y cierre de la puerta, aspecto crucial en la competitividad del producto como se ha especificado con anterioridad. El tiempo de apertura actual es de 2h y 2h de cierre, con un total de 4 h en el proceso. El tiempo por mejorar es este haciendo que, no solo el proceso de apertura y cierre sean menores sino también los procesos previos sean menores, tales como el desanclado de los cables a la losa entre otros.

3.2. Aproximación estructural

Para la optimización de la puerta delantera del hangar se consideran diversas opciones de carácter estructural que permiten optimizar su funcionamiento y que se tendrán en cuenta en el proceso de diseño siempre cumpliendo con unos requisitos mínimos y básicos:

- Disposición de nuevas barras. Se considera la posibilidad de disponer barras de conexión entre los elementos estructurales existentes para incrementar la rigidez del conjunto.
- Cables. También se cuenta con la posibilidad de disponer cables, en la medida que no estén conectados a la losa para facilitar las operaciones de apertura-cierre.
- Secciones. Se puede también disponer distintas secciones para las diversas partes de la puerta ya sean mástiles o barras metálicas del carro.
- Se considera la posibilidad de emplear distintas secciones en las barras de la estructura metálica en función del estado tensional observado en cada parte, en aras a optimizar el peso total de la estructural.
- Número y localización de los apoyos. También cabe la posibilidad de distribuir los apoyos a libre elección por la base teniendo en cuenta que en la medida de lo posible se deberán reducir al máximo.

3.3. Simulación numérica

El problema del hangar que se presenta se ha calculado usando una simulación numérica calculada con el programa RAMSeries® desarrollado por COMPASS® y la herramienta de pos proceso GID® desarrollada por CIMNE®.

El problema del cerramiento delantero planteado es un problema geoméricamente no lineal debido a los elementos estructurales considerados, particularmente membranas y cables, debidos a su deformabilidad.

Se asume además un comportamiento elástico lineal para los materiales.

El problema no lineal implica un esquema iterativo de resolución basado en algoritmos de predicción-corrección. Se ha resuelto mediante un esquema de control incremental de cargas con un número de pasos de incremento de carga entre 10 y 35.

La estabilidad del problema no lineal reclama además un método de estabilización para facilitar la convergencia de la solución.

La discretización del problema se ha llevado a cabo por el método de elementos finitos.

El sistema de ecuaciones resultante del problema no lineal resuelto mediante el algoritmo de Newton-Raphson. La solución obtenida es una solución aproximada de la ecuación diferencial del problema, cuya precisión depende del refinado de la malla.

Además, se han considerado 3 tipos de elementos, y se han idealizado utilizando los siguientes criterios, teniendo en cuenta que la idealización del problema se ha desarrollado en 3D.

Para los elementos viga, se han considerado elementos unidimensionales de viga que transmiten todos los esfuerzos.

Los cables se han modelado mediante elementos unidimensionales que trabajan exclusivamente a carga axial de tracción.

Por lo que respecta a las membranas, se han considerado elementos de membrana.

En el siguiente apartado se presenta el modelo numérico empleado para la obtención de la respuesta estructural de la puerta con los condicionantes específicos del proceso de diseño.

4. PROCESO DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Este proceso de diseño en cada apartado se considerara un nuevo diseño, con sus dimensiones en primer lugar así como una explicación de los elementos estructurales y su función. Seguido se explicarán los esfuerzos producidos en la estructura. Por último se analiza en función de las tensiones las posibles mejoras o defectos que tiene el modelo diseñado para pasar al siguiente modelo.

4.1. Modelo 1. Cables conectados al mástil superior

El primer modelo consiste en una estructura con 4 mástiles sobre los que se aplica una carga distribuida equivalente a la carga de viento sobre los tubos hinchados. Esta carga esta especificada en el apartado 2.1.2.

El carro se ha modelado mediante una estructura metálica con una única sección tanto para la base como para las barras transversales del cuerpo. La base consta de un gran entramado en celosía de sección tubular. Por otra parte los mástiles están conectados por barras en la dirección del viento dando una mayor rigidez en ese sentido.

Se considera la posibilidad de incrementar la rigidez de la puerta mediante cables que transmiten los esfuerzos entre los distintos elementos estructurales. Se consideran dos tipologías de cables: por una parte los cables que conectan los mástiles a la base, haciendo que los desplazamientos sean mucho menores y por otra parte las cruces de San Andrés situadas entre mástiles, que mejoran la transmisión de los esfuerzos entre los mismos.

En la Figura 13 se pueden observar diversas vistas del modelo presentado en las que se aprecian los elementos estructurales mencionados.

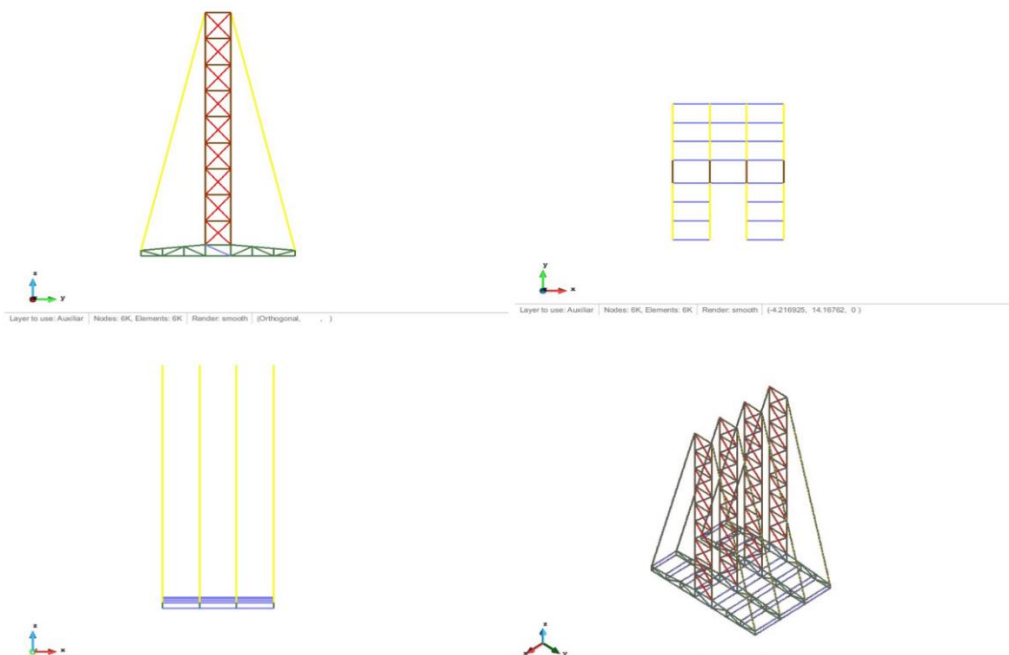


Figura 13. Descripción geométrica del modelo 1

Las secciones consideradas en el modelo 1 para las vigas y los cables junto con sus propiedades mecánicas se especifican en la Tabla 2.

	Sección 1	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso lineal (m)
Base	90X90X4	13,76	3174,43	10,79
Mástil	120X80X6	22,56	2903,24	17,70
Sección transversal	120X80X6	22,56	1274,59	17,70
Cables	Φ20	3,14	633,55	2,46
Cables cruz de S. Andrés	Φ16	2,01	343,94	1,57

Tabla 2. Secciones modelo 1

En este caso las tensiones máximas se dan en la base con un valor de 254 N/mm² como se puede observar en la Figura 14, bastante inferior a los 355 N/mm² que puede aguantar el material utilizado. Además, los mástiles sufren muy poco en comparación con la base y se podría optimizar más de no ser porque si no la estructura sufre de pandeo.

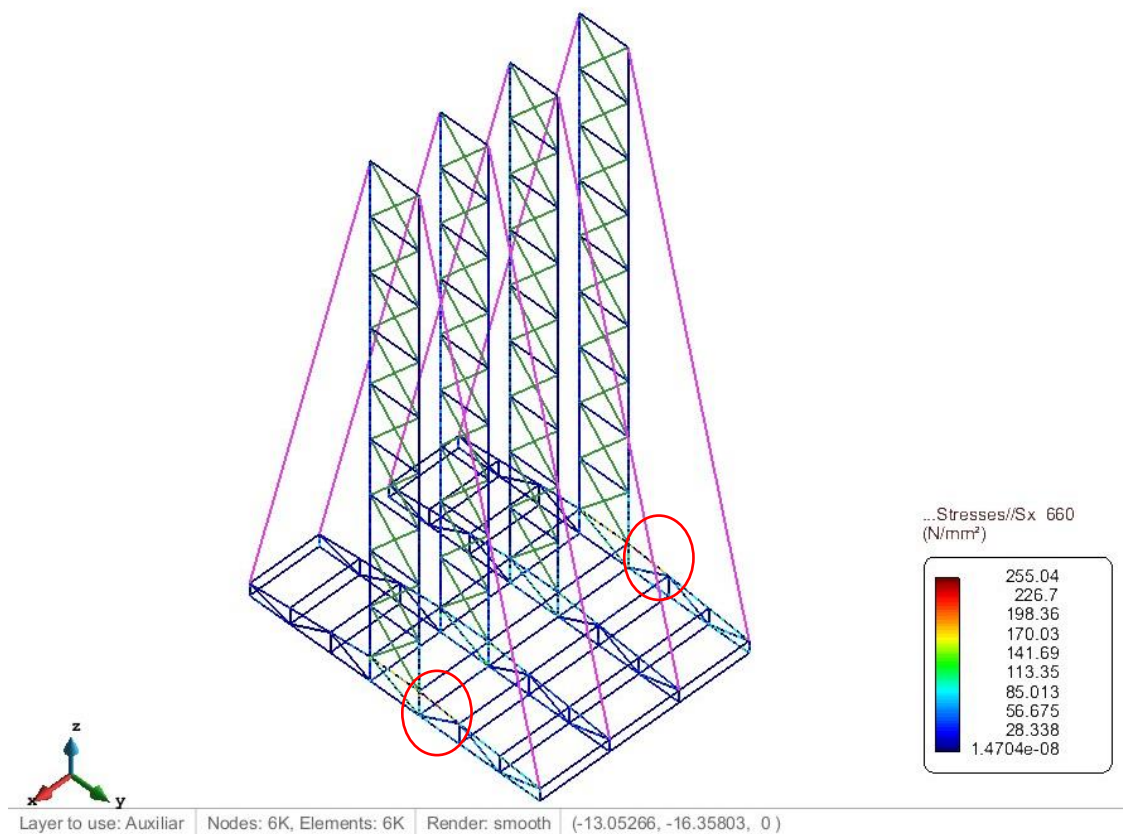


Figura 14. Tensiones normales modelo 1

En cuanto a tensiones en la base se refiere, como se muestra en la Figura 15, tensiones máximas se producen en la parte inferior de los mástiles.

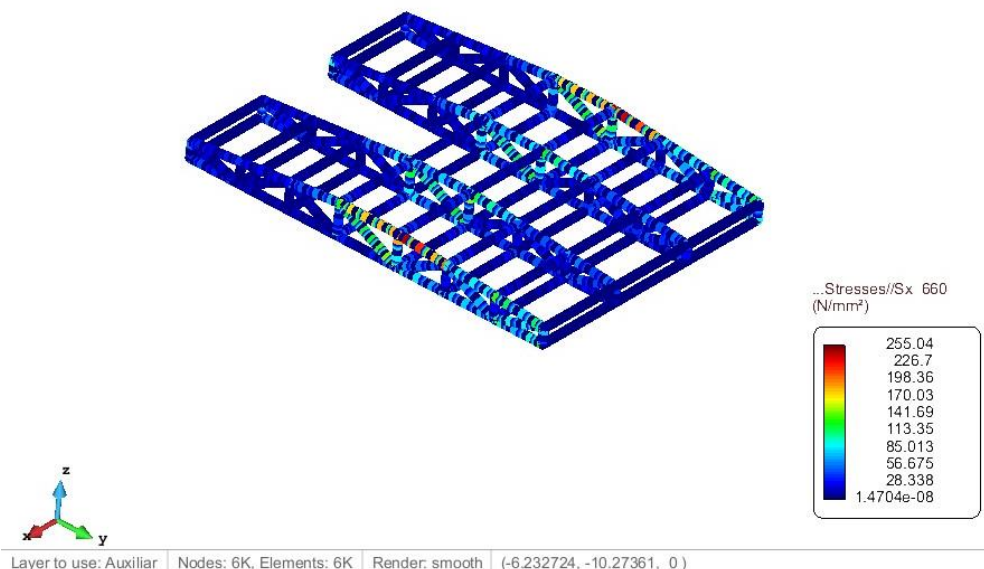


Figura 15. Tensiones en el carro 1

Por otra parte, se deberá tener en cuenta las tensiones en los mástiles ya que también es una parte crítica, aunque siendo a pandeo más crítica que a fallo debido a tracción. Se puede observar que la tensión máxima se produce en la parte inferior como se representa en la Figura 16. Por esta razón la sección no se puede reducir más.

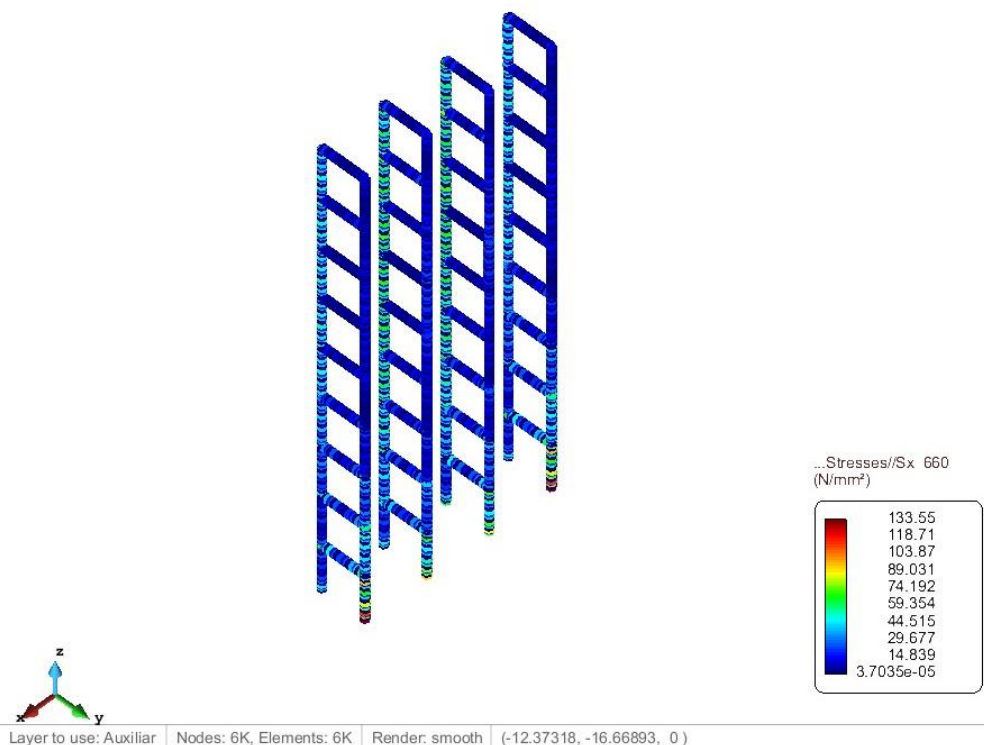


Figura 16. Tensiones en el mástil modelo 1

Cabe decir que esta base esta solamente apoyada en los extremos conformando una disposición similar a una viga biapoyada hecho que provoca unas elevadas tensiones en la

parte central de lo que sería el vano. Esto se puede ver con mayor claridad en la Figura 17 y la Figura 18.

En este punto se plantea hacer distintas secciones para las distintas partes de la puerta en función de la tensión a la que están sometidas pero la principal razón por lo que no se hace es debido a los diferentes problemas que plantea una solución de este tipo haciendo más difícil su ejecución.

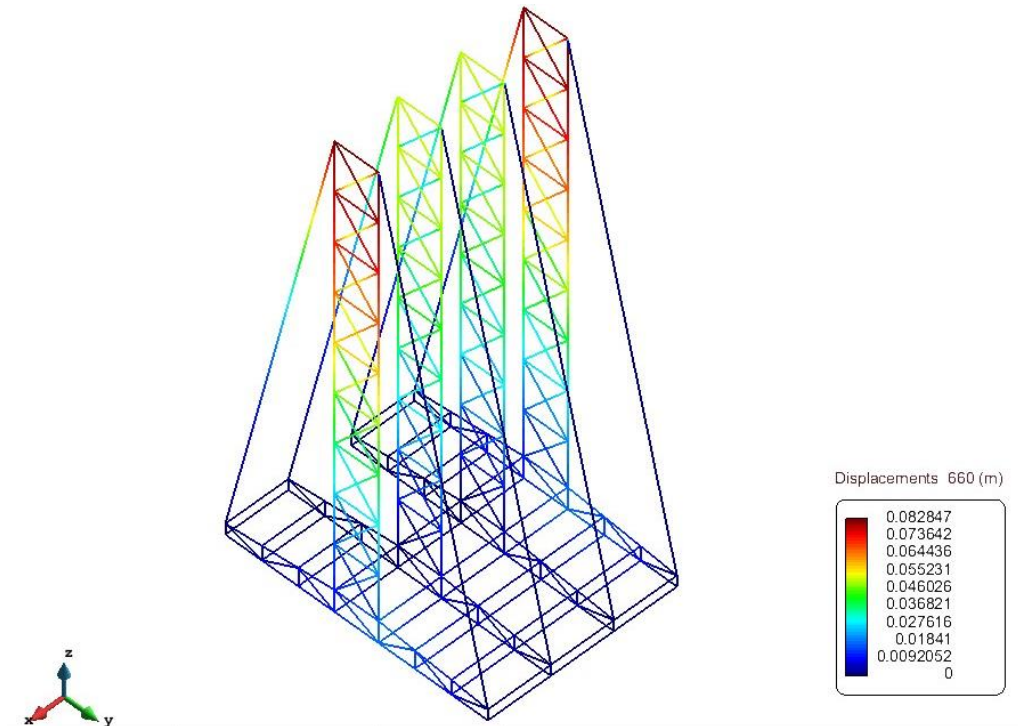


Figura 17. Desplazamientos totales modelo 1

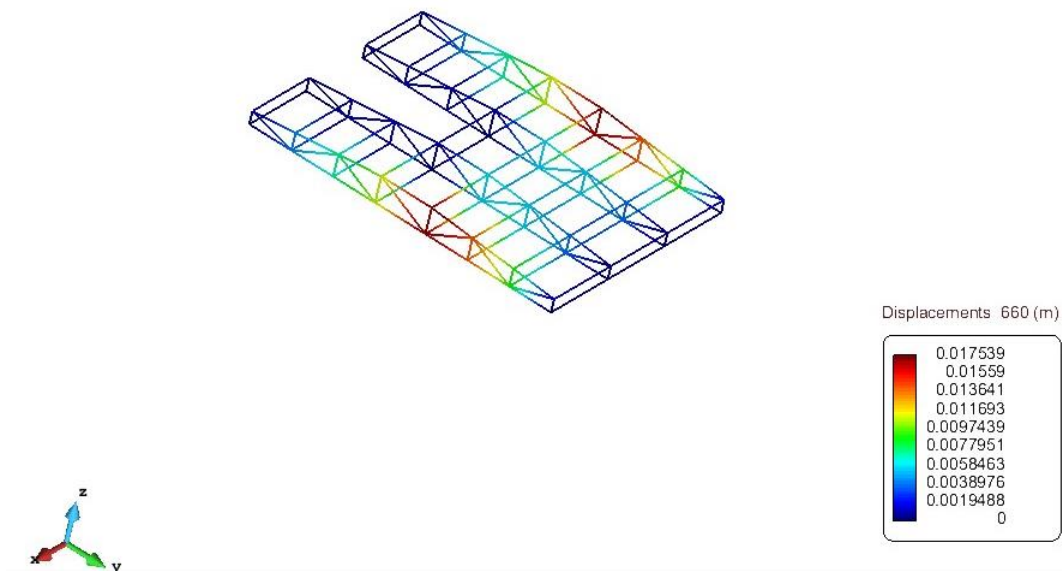


Figura 18. Desplazamientos en la base modelo 1

Cabe recalcar las fuerzas a las que están sometidos los cables puesto que estas fuerzas pueden llegar a ser muy grandes, se observa que tienen un valor máximo de 83 kN en los cables más grandes que sujetan el mástil (Figura 19).

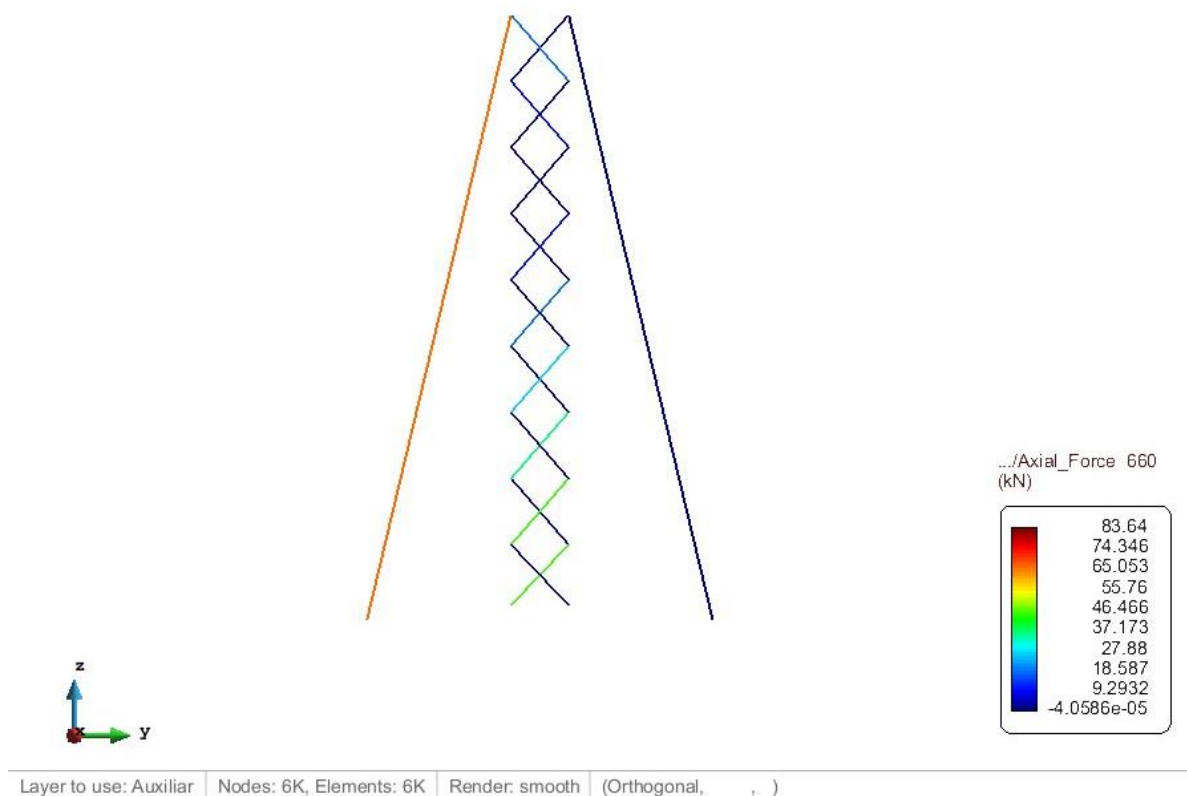


Figura 19. Axiles en los cables modelo 1

La idea es optimizar la sección de tal manera que se pueda reducir el peso y sección y también actuando lo mínimo posible sobre la losa, para una más sencilla apertura y cierre de la puerta. En este caso el peso que sale de este modelo es de 8425,01 kg. Este valor es orientativo puesto que a este valor se debería añadir el peso de la tornillería y elementos complementarios.

En este modelo las tensiones más importantes se producen debajo de los mástiles en la base. El valor de la tensión máxima es de 255 N/mm² no supera el límite elástico del acero ni la tensión máxima admisible.

Una vez acabada esta simulación se puede observar que no es una solución eficiente. La idea de que las cargas se transmitan solidariamente a lo largo de toda la estructura no se cumple en este caso, recayendo en su gran mayoría a la sección inferior al mástil de la base. Además, se tiene un problema de inestabilidad a pandeo debido a la esbeltez del mástil. En vista de esta ineficiencia se procede a un segundo diseño de la puerta en el apartado de la Modelo 2.

4.2. Modelo 2. Cables anclados a un 70% de la longitud del mástil

En esta solución se pretende comparar el modelo anterior con una solución en la que se igualen los momentos negativos y positivos en la sección a la que se sujeta el cable y a media

altura respectivamente. Con este modelo se pudo ver cómo se comporta la estructura y sus desplazamientos al aplicar esta solución y así plantear esta opción para futuros modelos.

En este caso al igual que el apartado anterior se tiene que el mástil, podría tratarse como una ménsula empotrada en la base y apoyada en donde lo sujeta el cable. El constriñe el movimiento del mástil, si es cierto que no actúa como un apoyo pero es una buena aproximación.

Para este modelo se opta por cambiar la disposición de los cables. Con esto se pretende igualar los momentos positivos y negativos de la estructura. Para ello se opta por anclar los cables a un 70% de la longitud del mástil. Dejando así un 30% de la estructura en voladizo tal como se muestra en la Figura 20.

Las tensiones producidas en el carro en este modelo se reducen considerablemente, aunque aumenten en el mástil. Esto último no supone un problema puesto que en el modelo anterior en el mástil casi no se producían tensiones en el mástil, y casi toda recaía en el carro.

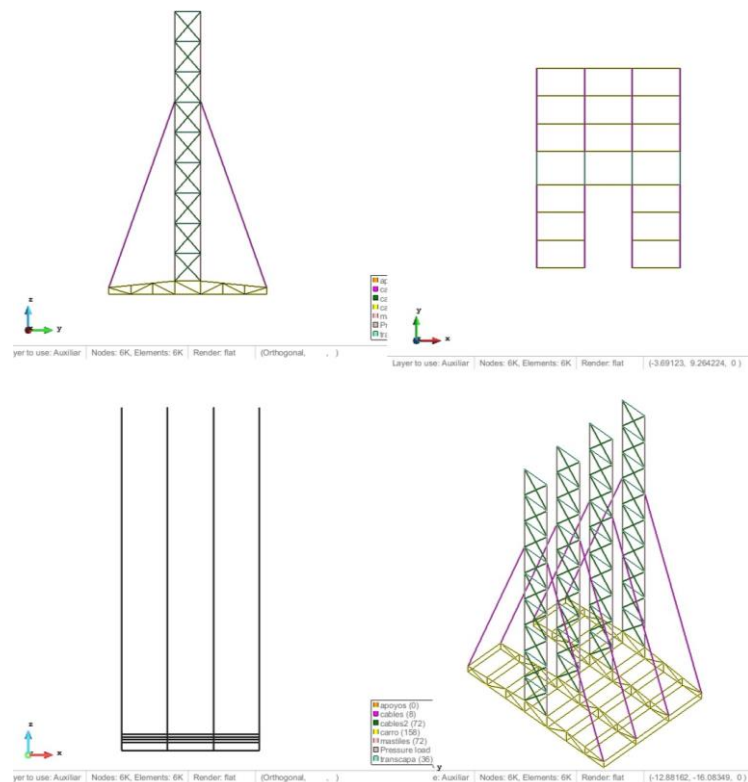


Figura 20. Descripción geométrica del modelo 2

Además, se ha visto en el modelo anterior que, pese a una mayor sencillez en fase constructiva, las secciones transversales en la dirección del viento trabajan poco en relación con el resto de la estructura y por tanto se ha reducido significativamente su sección. Esto podría complicar las cosas en su fase constructiva a la hora de soldar, pero podrá reducir considerablemente el peso.

En este modelo se consideran unas secciones más pequeñas, cuyas propiedades mecánicas se especifican en la Tabla 3.

Se puede observar que en relación con el modelo anterior se reduce la sección en cuanto a espesor, pasando de una sección de 6 mm de espesor a 4 mm. Las secciones están igualmente hechas de acero S355.

PARTE	Sección 1	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso lineal (m)
base	90X90X4	18,56	3174,43	10,79
mástil	140X100X4	13,76	2388,48	17,70
Sección transversal	100X100X4	15,36	867,80	17,70
cables	Φ20	3,14	633,55	2,46
Cables cruz de S. Andrés	Φ16	2,01	343,94	1,57

Tabla 3. Secciones modelo 2

Las tensiones máximas producidas en este modelo al igual que el anterior, se producen en la base de la con valores máximos de 286.7 MPa como se puede ver en la Figura 21.

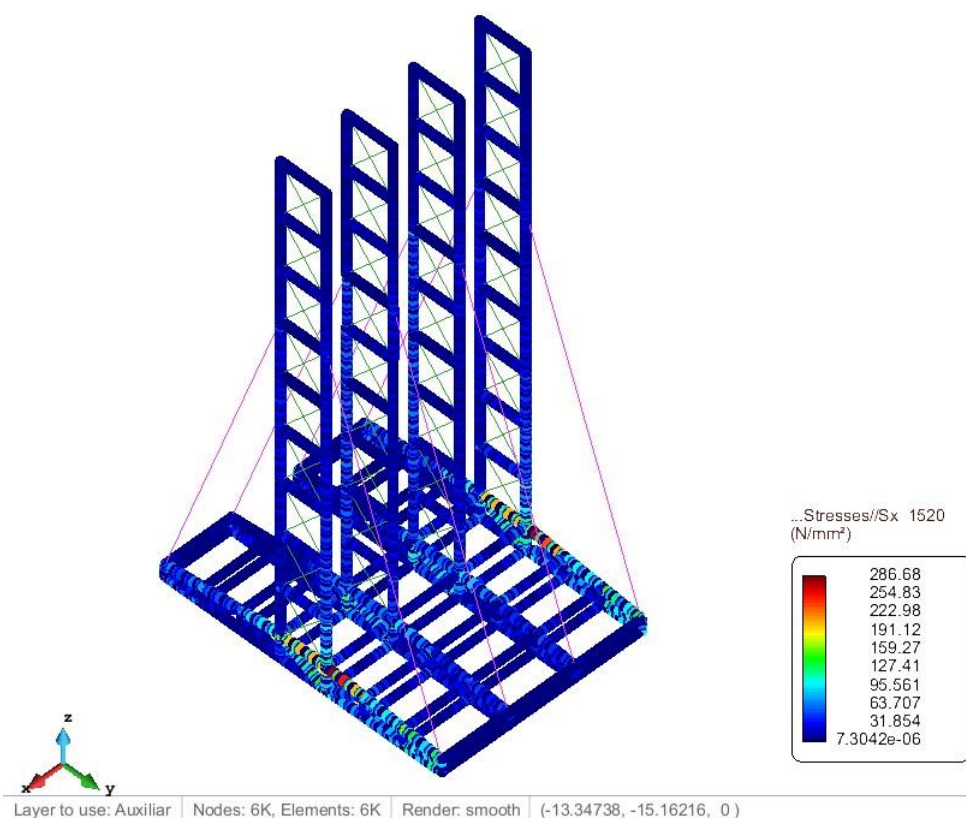


Figura 21. Tensiones totales modelo 2

En la base es importante observar con detalle la parte más solicitada a tensión normal. En la Figura 22 se puede observar que las tensiones están concentradas en las barras de la dirección del viento por lo que una reducción de las secciones transversales al viento sería una opción factible.

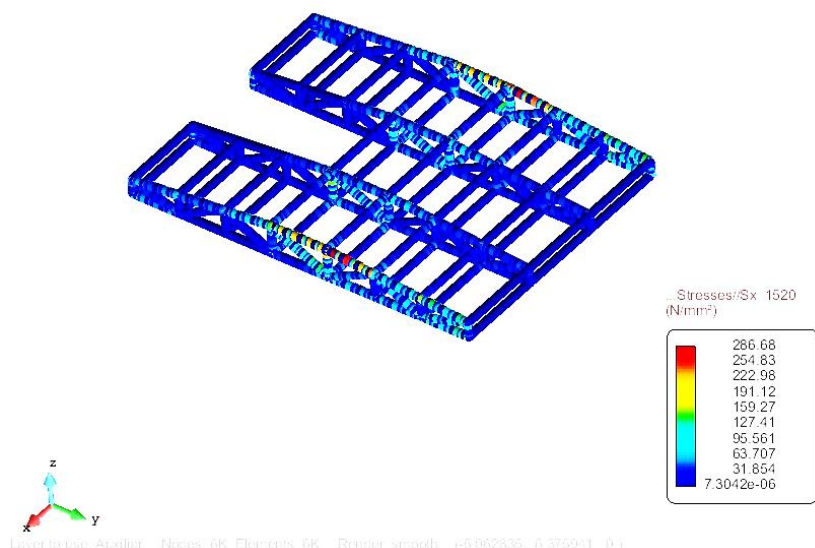


Figura 22. Tensiones base modelo 2

Los mástiles por otra parte como no tienen mayor problema que el fallo a pandeo debido a la compresión que se produce por la parte posterior en la dirección de aplicación de la fuerza del viento. Debido a este problema en siguientes modelos se propone una solución con una sección transversal al viento para intentar mitigar el pandeo. (Figura 23).

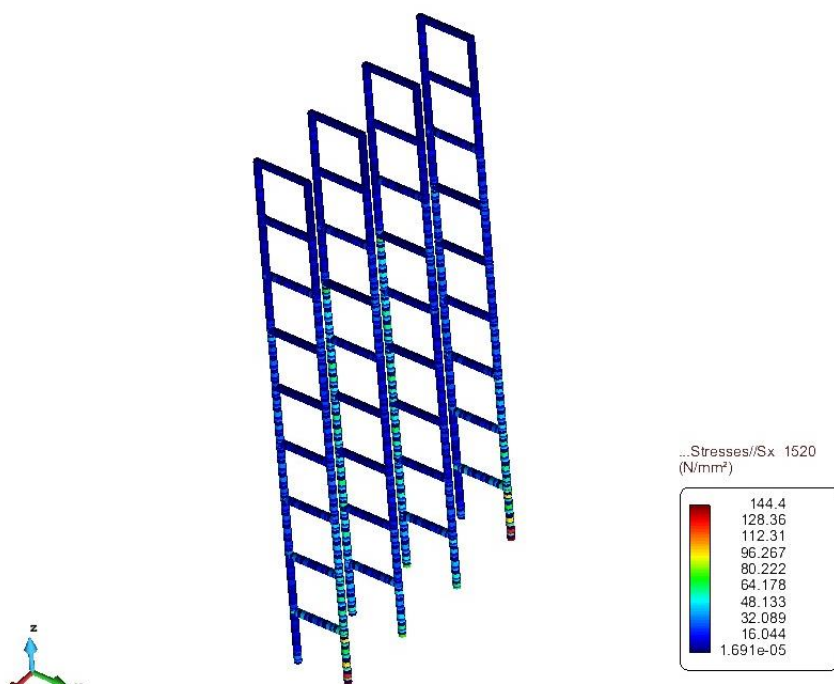


Figura 23. Tensiones mástil modelo 2

Estos desplazamientos obtenidos se pueden observar en la Figura 24. Según se observa, los desplazamientos son muy inferiores a los de las puertas actuales que son de alrededor de unos 16 cm. En este caso los desplazamientos se reducen a 9-10 cm en la parte superior del mástil. Como era de esperar son algo superiores a los del modelo anterior pero la diferencia no es relevante.

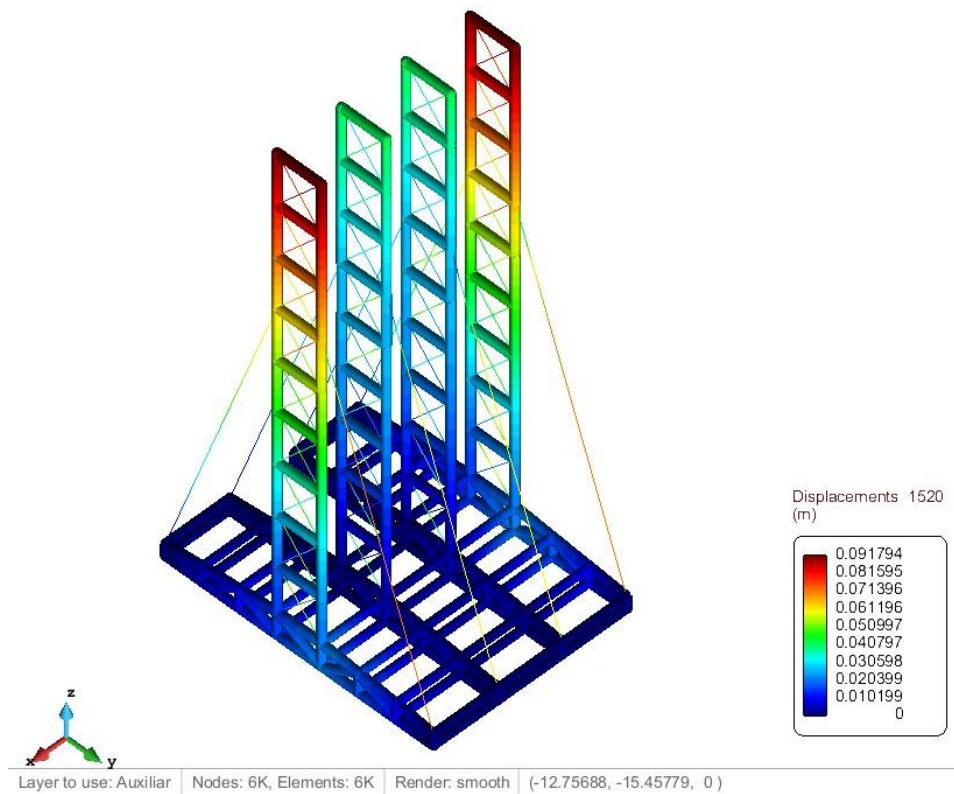


Figura 24. Desplazamientos modelo 2

Por último, las tensiones en los cables son dignas de mención. La Figura 25 muestra los esfuerzos axiales sobre los cables.

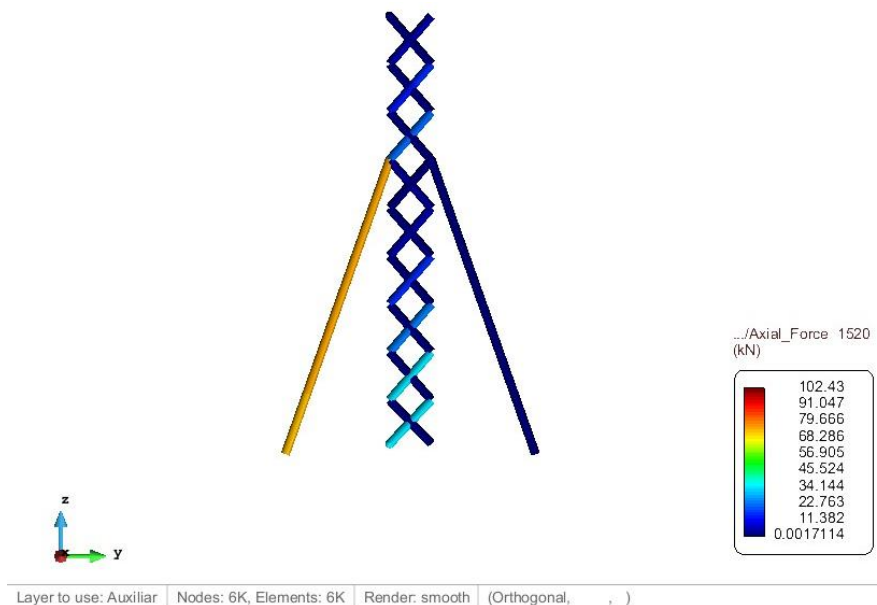


Figura 25. Axiles cables modelo 2

El principal problema, pues, que se nos presenta en este modelo es el estado límite último de pandeo ya que en este modelo 2 el pandeo es más crítico que en el modelo 1.

Los valores máximos se pueden encontrar en la base de la estructura con un valor máximo de 266 N/mm^2 . Este valor no supera el valor máximo admisible de tensión máxima.

Por último, hay que especificar que el peso resultante de este modelo es de unos 7372 kg a los que se le añaden tornillería y complementos que dependerán del grado de sofisticación y distintas secciones que tenga el modelo. En este caso se ha conseguido reducir el peso del anterior Modelo 1. Cables conectados al mástil superior En vista de los resultados se deduce que se pueden reducir algunas secciones como las transversales al viento en la base o en el mástil.

En vista de los resultados obtenidos, se observa que existe una reducción de la tensión en el mástil, pero un aumento en la base. Como consecuencia se procede pues, a la combinación de la Modelo 1. Cables conectados al mástil superior y el Modelo 2. Cables anclados a un 70% de la longitud del mástil, con la intención de reducir los esfuerzos en el mástil al mismo tiempo que se reducen en la base

4.3. Modelo 3. Cables arriba y abajo

Para esta solución se plantea la posibilidad de reducir los esfuerzos tanto en la base como en el mástil, reduciendo los esfuerzos en el mástil sin incrementar los esfuerzos en la base. Con esta solución se pretende tener una mejora en lo que respecta a la distribución de los esfuerzos sobre la estructura y sopesar si vale la pena añadir un cable más.

En este modelo se plantea poner cables no solo a un 70% de la longitud del mástil sino en la punta del mástil intentando que los desplazamientos en la punta del mástil sean lo más pequeños posibles, e intentar que las tensiones en la base del carro se repartan para posteriormente intentar reducir el peso de éste. La Figura 26 muestra la descripción geométrica de este modelo.

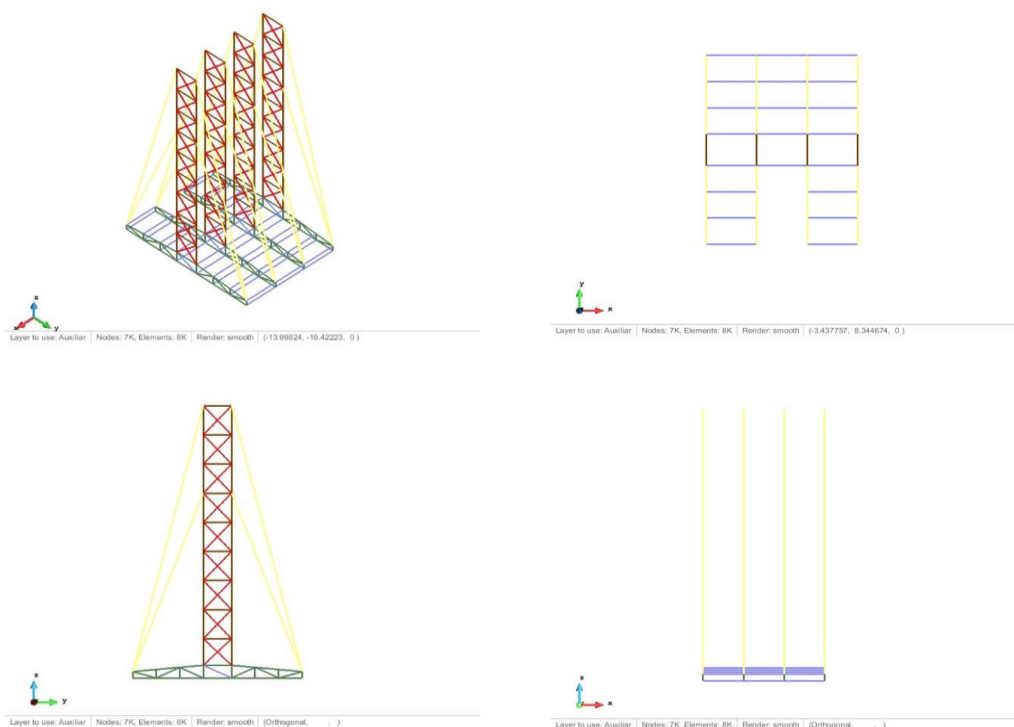


Figura 26. Descripción geométrica del modelo 3

Las secciones de los elementos estructurales involucrados en este modelo se especificadas en la Tabla 4. Por lo que hace el material todas las secciones son de acero s355.

PARTE	Sección 1	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso lineal (m)
base	90X90X4	18,56	3174,43	10,79
mástil	120X100X4	13,76	2182,57	17,70
Sección transversal	100X100X4	15,36	867,80	17,70
cables	Φ20	3,14	633,55	2,46
Cables cruz de S. Andrés	Φ16	2,01	343,94	1,57

Tabla 4. Secciones modelo 3

Primero se podrá observar que efectivamente las tensiones se reducen las tensiones máximas se reducen en la zona más crítica e incrementan en los extremos del carro como se muestra en la Figura 27 así como se puede observar también una tímida reducción de los desplazamientos máximos en la Figura 28.

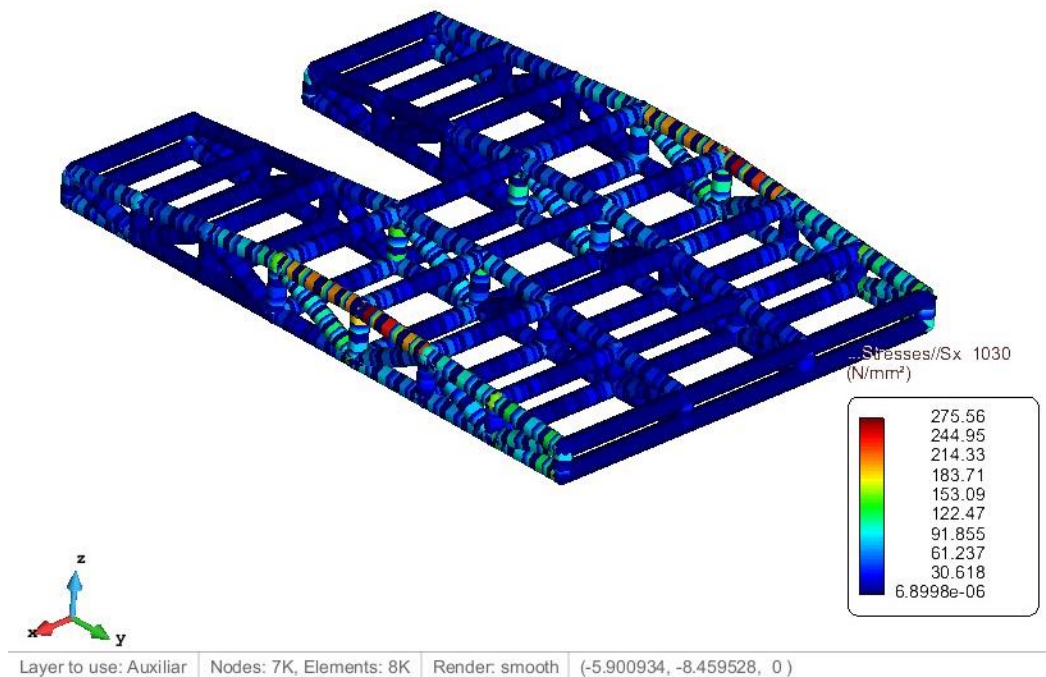


Figura 27. Tensiones en la base 3

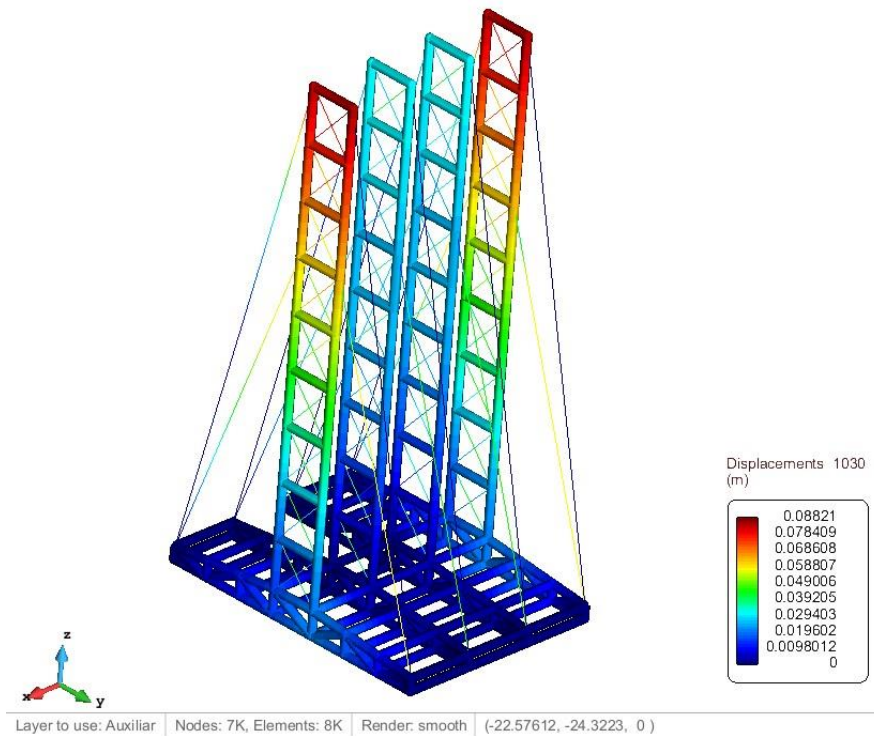


Figura 28. Desplazamientos completos modelo 3

Por lo que se refiere al mástil realmente no sufre mucho a tensión y como se ha indicado en modelos anteriores el problema principal reside en el fallo por pandeo, se puede observar las tensiones en la Figura 29 .

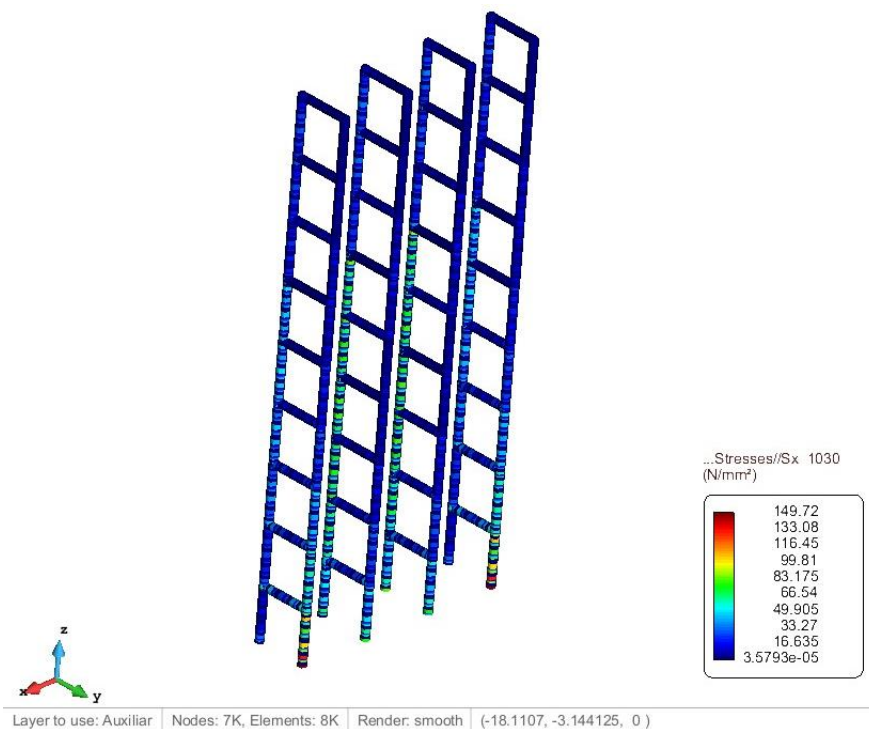


Figura 29. Tensiones en el mástil modelo 3

Por otra parte, cabe recalcar las tensiones que se producen en los cables, que pueden observarse en la Figura 30.

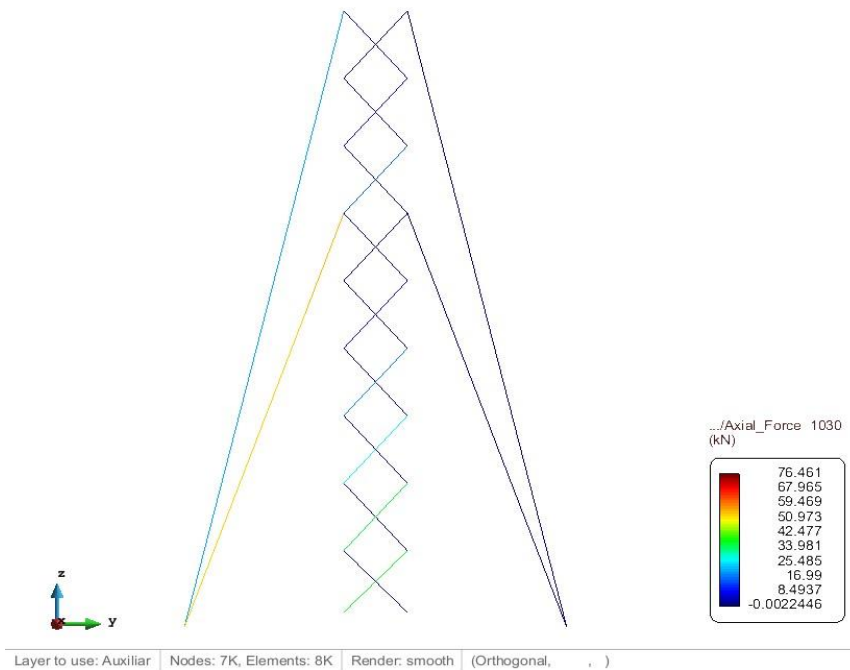


Figura 30. Fuerzas en los cables modelo 3

Por último, como ya se ha especificado con anterioridad la intención de este rediseño es la optimización y la fácil movilidad de la puerta a la hora de abrir y cerrar el hangar, y esto pasa en primer lugar por reducir el peso, en este caso el cálculo del peso aproximado con un material de acero s355 es de 7288 Kg.

Sí es cierto que las tensiones en general incrementan, pero también al mismo tiempo se observa que los desplazamientos se reducen en gran medida. Puesto que las secciones aguantan 355 MPa y aún pueden aguantar más, ya que las tensiones máximas se producen al igual que en los apartados anteriores en la base por debajo del mástil con una tensión máxima de 275 N/mm². En este punto supone un avance en la mejora de la puerta puesto que otro aspecto importante dentro de los requisitos impuestos para la nueva puerta es reducir los desplazamientos al máximo.

En este punto, ya se plantea, una vez estudiados los tres casos de la disposición de los cables, proceder a la solución de la inestabilidad producida por el pandeo de la estructura.

4.4. Modelo 4. Doble cable + vigas transversales a la dirección del viento

Para este modelo se plantea de otro método distinto a los tubos hinchables como membranas, lo cual permite disponer pues, unas vigas transversales a la dirección del viento para intentar mitigar el problema del pandeo.

Para la disposición de los cables se escoge el sistema del Modelo 3. Cables arriba y abajo. Además en este modelo se han dispuesto unos apoyos adicionales en la base, concretamente en el centro de esta. Gracias a esta mejora se espera que las tensiones en la base se reduzcan significativamente dando más margen a reducir sección y por consiguiente peso total de la estructura.

Para este modelo, se desestima el uso de las grandes membranas tubulares y pasando a unas secciones lenticulares cerradas más pequeñas como se ha dicho anteriormente. Las vigas transversales permiten la posibilidad de reducir la sección del mástil. Este modelo se puede ver en la imagen Figura 31.

Las secciones por tanto como se ha dicho anteriormente quedan reducidas y quedan especificadas en la Tabla 5.

PARTE	Sección 1	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso m lineal (Kg)
Base	90X90X4	13,76	3174,43	10,79
mástiles	100X80X5	17	2187,72	13,33
Sección transversal en dirección al viento	45X45X4	6,56	370,62	5,14
Sección transversal perpendicular al viento	45X45X4	8,64	738,99	6,77
Cables	Φ20	3,14	633,55	2,46
Cables cruz S. Andrés	Φ16	2,01	343,94	1,57

Tabla 5. Secciones modelo 4

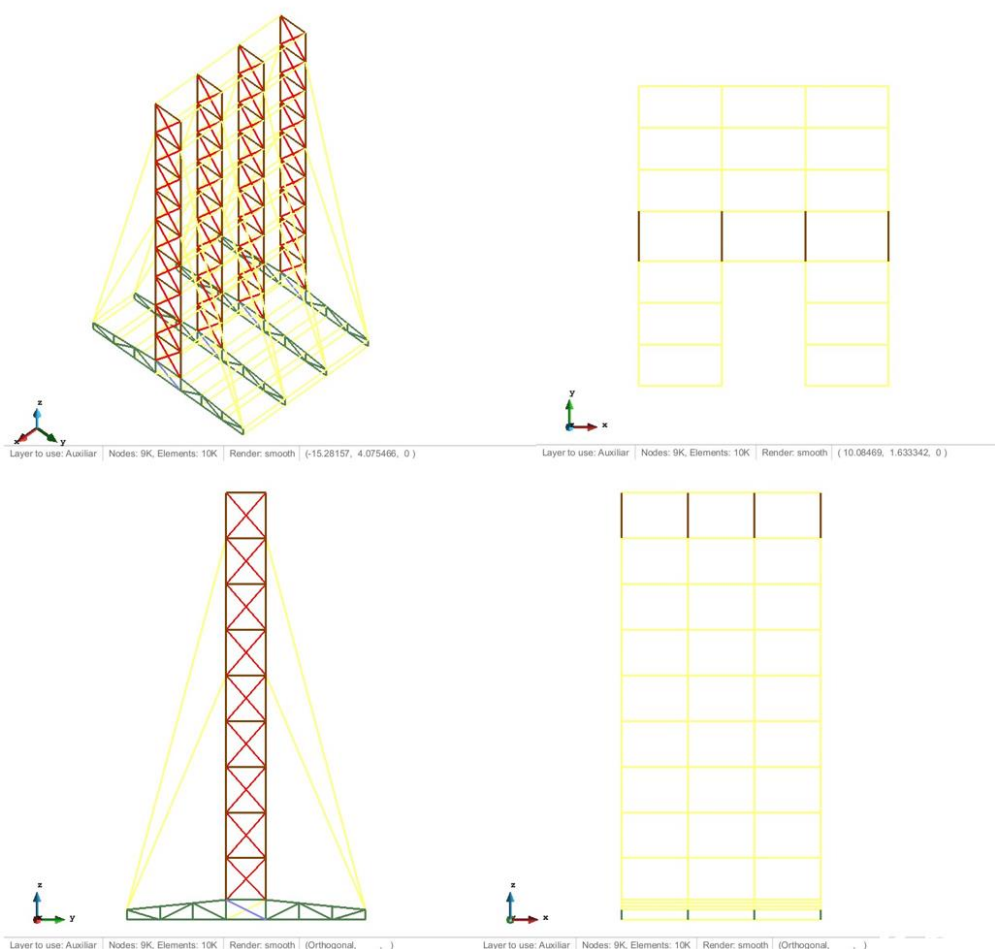


Figura 31. Descripción geométrica del modelo 4

Por lo que respecta a las tensiones como en todos los modelos anteriores el punto crítico se sitúa en la parte inferior del mástil sometido a compresión, en lo que sería propiamente la base de la puerta, con una tensión máxima de 263 N/mm² como se puede ver en la Figura 32:

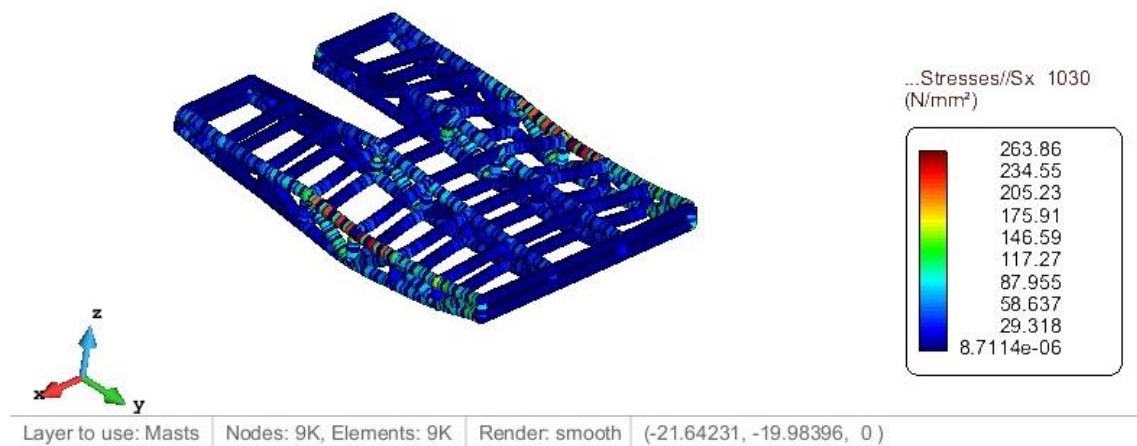


Figura 32. Tensiones base modelo 4

Cabe destacar que el carro sufre unas deformaciones significativas en la propia base de unos 2cm aproximadamente, pero no debería resultar un problema (Figura 33/Figura 34)

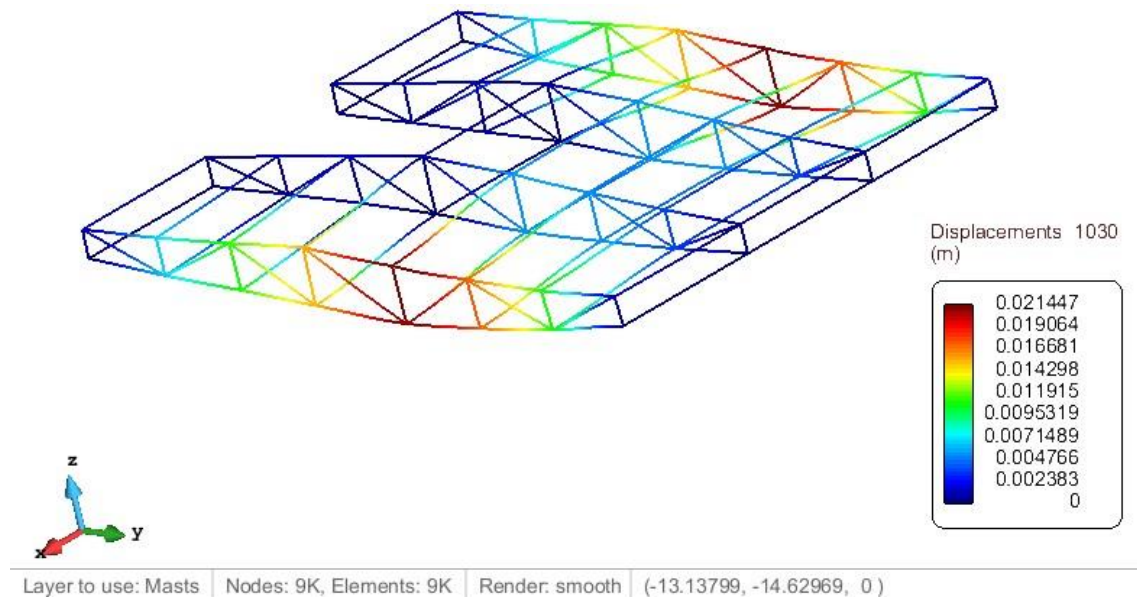


Figura 33. Desplazamientos en la base modelo 4. Vista general

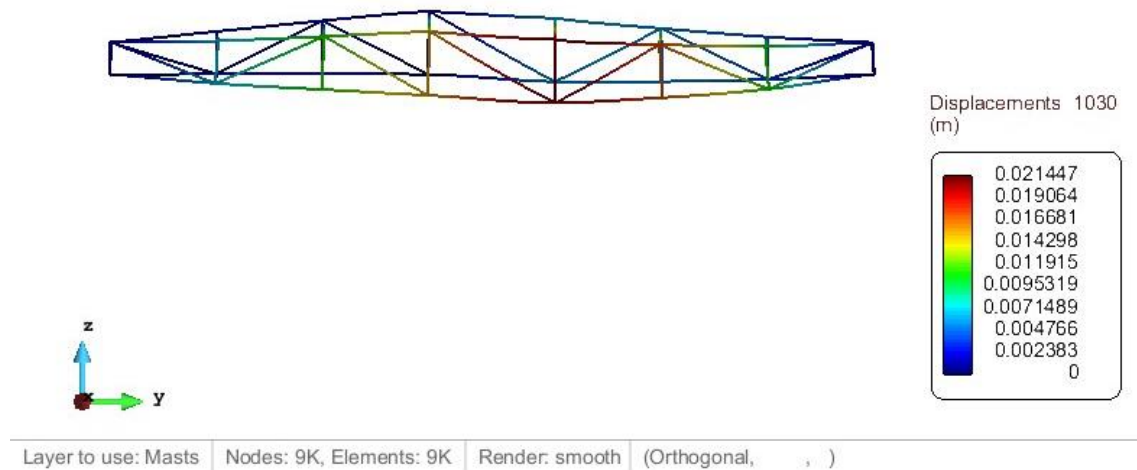


Figura 34. Desplazamientos en la base modelo 4 Vista perfil

En cuanto a las tensiones en el mástil se puede ver que no está en una situación tan crítica como en el caso de la base, pero, el principal problema del mástil no es su fallo por exceder la tensión máxima sino por un fallo debido al pandeo, en este modelo, las secciones se han reducido al máximo. En caso de reducir más la sección se empiezan a encontrar problemas de pandeo. Como se puede ver en la Figura 35 la tensión máxima del mástil es de 160 N/mm^2 , las secciones que están en la dirección x (normales a la dirección del viento) son necesaria ya que con una sección más bien pequeña se consigue reducir mucho la sección del mástil sin que pandee y ganar ligereza.

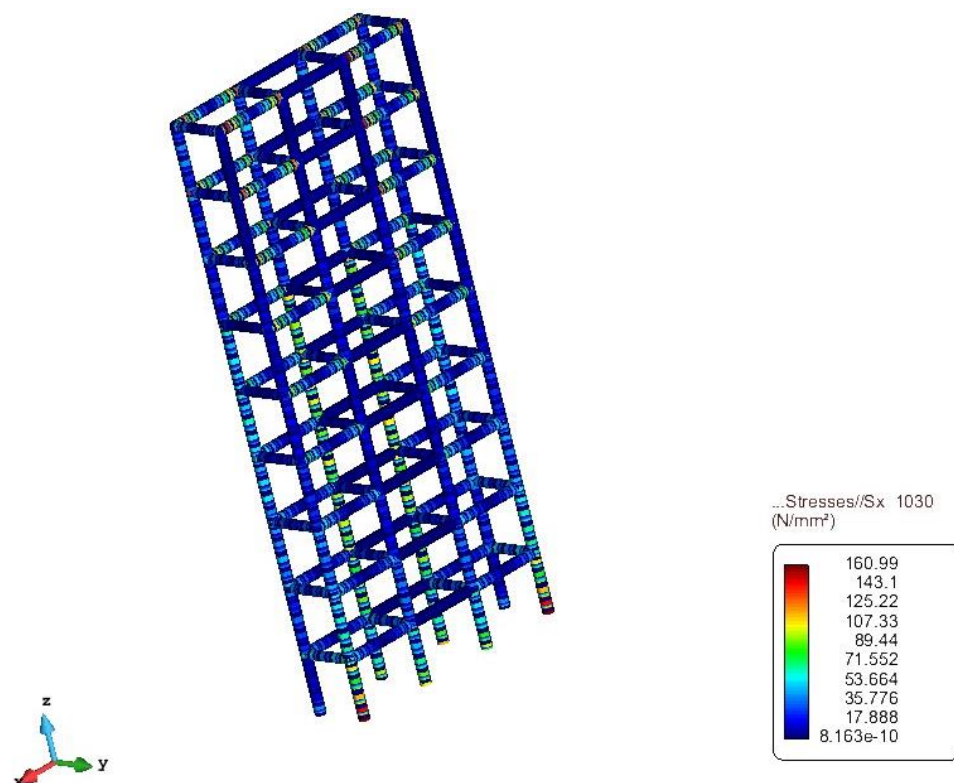


Figura 35. Tensiones en el mástil modelo 4

Por lo que respecta a los desplazamientos son moderados y aceptables, teniendo un desplazamiento máximo en la punta del mástil y teniendo un valor máximo de 9 cm como se ve en la Figura 36.

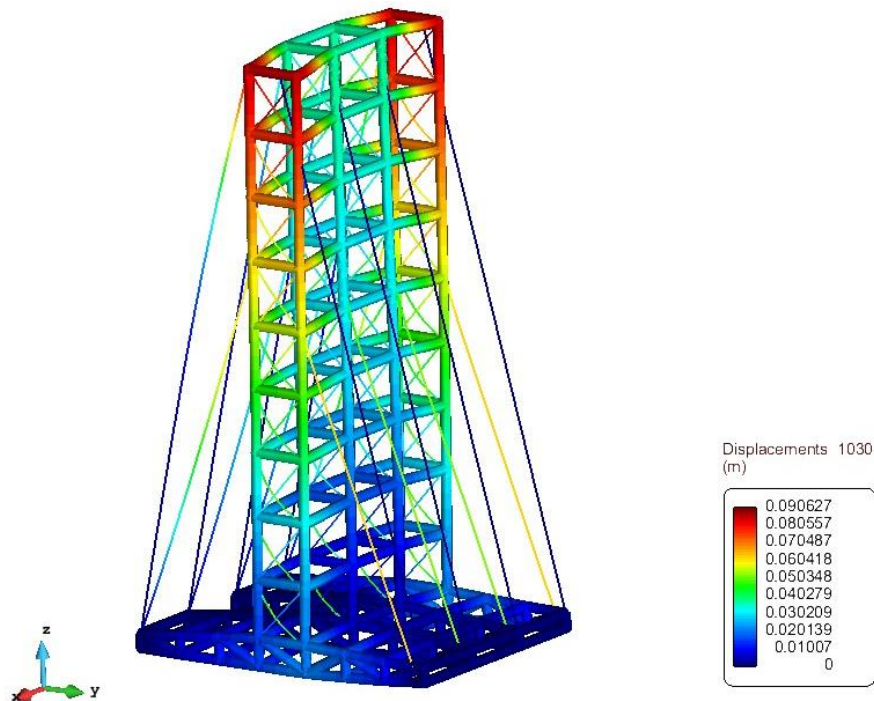
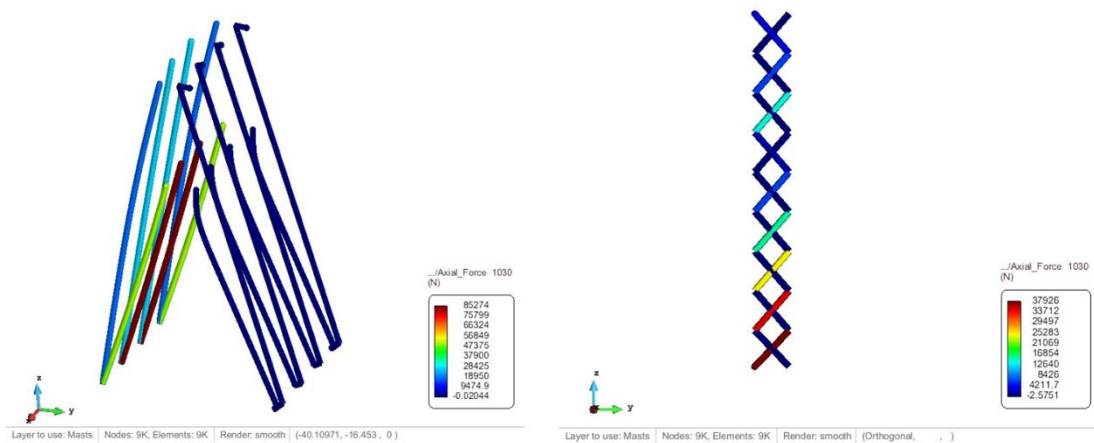


Figura 36. Desplazamientos totales modelo 4

Finalmente, las tensiones que se producen en los cables no comprometen mucho a la estructura por lo que respecta al peso, siendo la suma del peso de todos los cables de



alrededor de unos 800kg más o menos (Figura 37):

Figura 37. Axiales en los cables modelo 4

En esta solución se observa que las barras transversales contribuyen a la mitigación del problema del pandeo, así pues, se llega a la conclusión de que son necesarias para el modelo final y futuros modelos.

Las tensiones máximas se producen en la base por debajo del mástil así como en los modelos anteriores por debajo del mástil y sin sobrepasar la tensión máxima admisible.

Por otra parte, se observa que es necesario disponer más apoyos sobre las secciones del carro, ya sea por los desplazamientos producidos como por la consiguiente tensión que se produce por una falta de estos apoyos.

Por último, se plantea la posibilidad de anclar el cable superior a un nivel inferior de la punta del mástil para reducir costes y dejar una disposición de una ménsula con un voladizo al final lo cual sube la ley de momentos repartiendo algo mejor los esfuerzos a lo largo del mástil.

4.5. Modelo 5. Apoyos intermedios y ménsula en voladizo

En este modelo lo que se ha ensanchado el carro y por consiguiente su correspondiente carga por mástil. Además en la parte más crítica debida a altas tensiones que se encuentra en la base debajo del segundo mástil en la dirección del viento, se le ha añadido una viga que se cruza a la que se tenía previamente reforzando dicha parte y aportándole más rigidez.

Otra innovación respecto al caso anterior consiste en la implementación de apoyos en la parte central de la base haciendo que la base pase de comportarse como una viga biapoyada en la que el único contacto a la losa sean los extremos, a una viga con más apoyos (16 en total) en la parte central de la base haciendo que la “luz” entre apoyos se reduzca así como las tensiones en la base o eso se pretende.

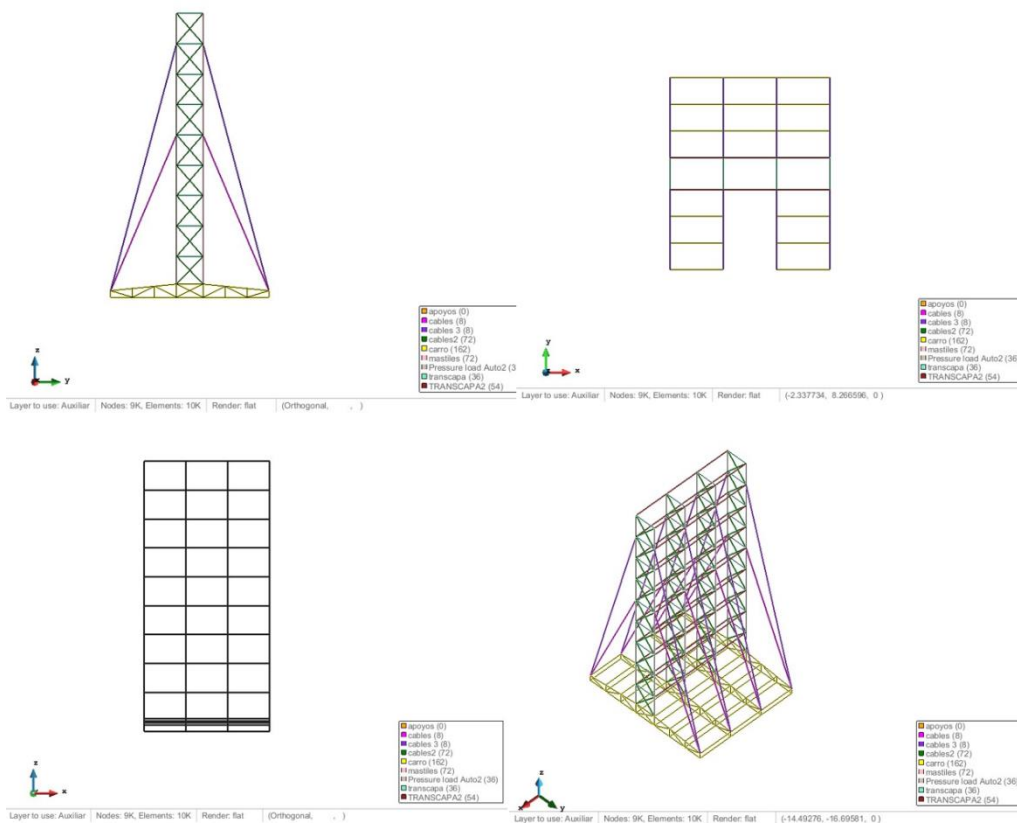


Figura 38. Descripción geométrica del modelo 5

Como se observa en la Figura 38, la disposición del cable superior se baja un nivel para dejar una última parte del mástil en voladizo y subir los momentos, de esta manera se pueden distribuir mejor los esfuerzos.

Además, en este modelo se han incrementado las dimensiones de la estructura incrementando el ancho de esta a 10 m.

Por lo que respecta a las características de las secciones empleadas éstas se describen en la Tabla 6. El peso que resulta de estas dimensiones es de 6,8 t algo inferior a la puerta actual.

PARTE	Sección 1	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso lineal (m)
base	90X90X4	18,56	3465,72	10,79
mástil	100X80X5	13,76	2187,72	17,70
Sección transversal	45X45X4	6,65	867,80	5,14
Sección en dirección del viento	45X45X4	6,65	926	5,14
cables	Φ20	3,14	633,55	2,46
Cables cruz de S. Andrés	Φ16	2,01	343,94	1,57

Tabla 6. Secciones modelo 5

Las tensiones en este modelo a diferencia de todos los modelos anteriores el punto crítico se sitúa en la parte inferior del mástil sometido a compresión, en lo que sería propiamente la base de la puerta, pero esta vez en la barra que sigue al mástil en vertical, con una tensión máxima de 88 N/mm² reduciendo considerablemente las tensiones producidas en los anteriores modelos, como se puede ver en la Figura 39 y Figura 40.

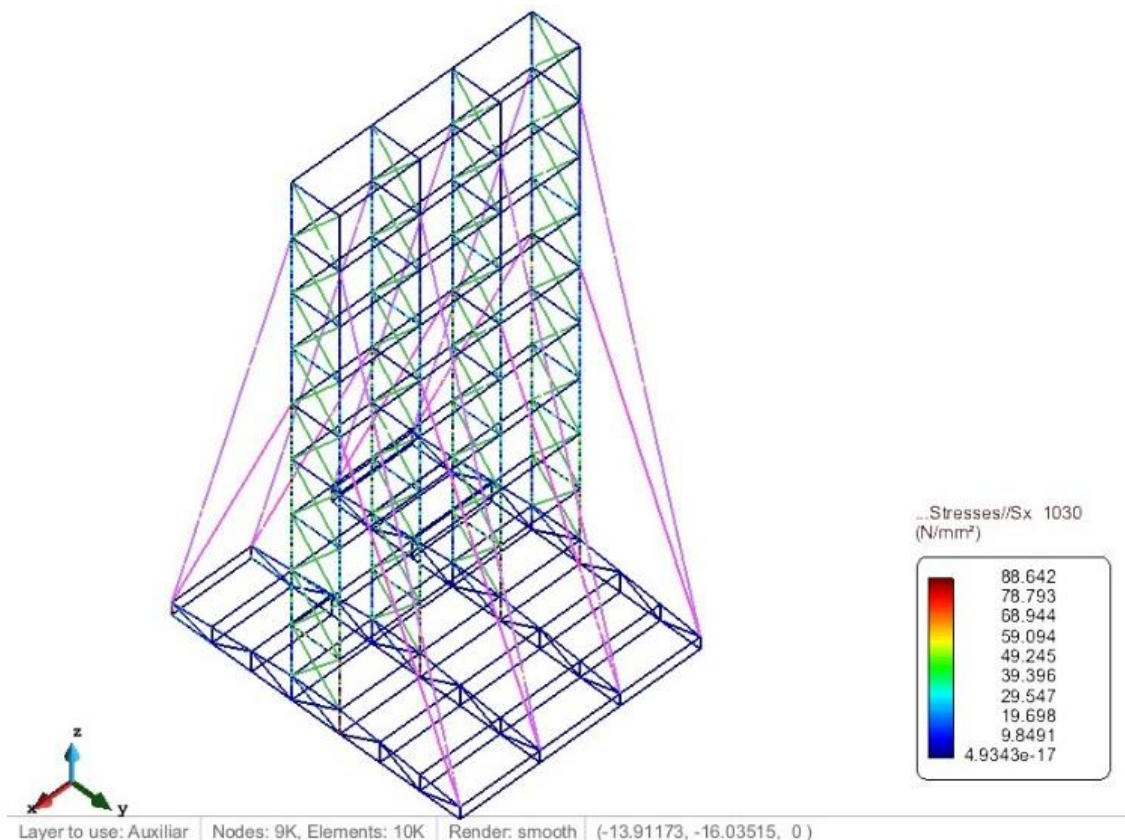


Figura 39. Tensiones totales modelo 5

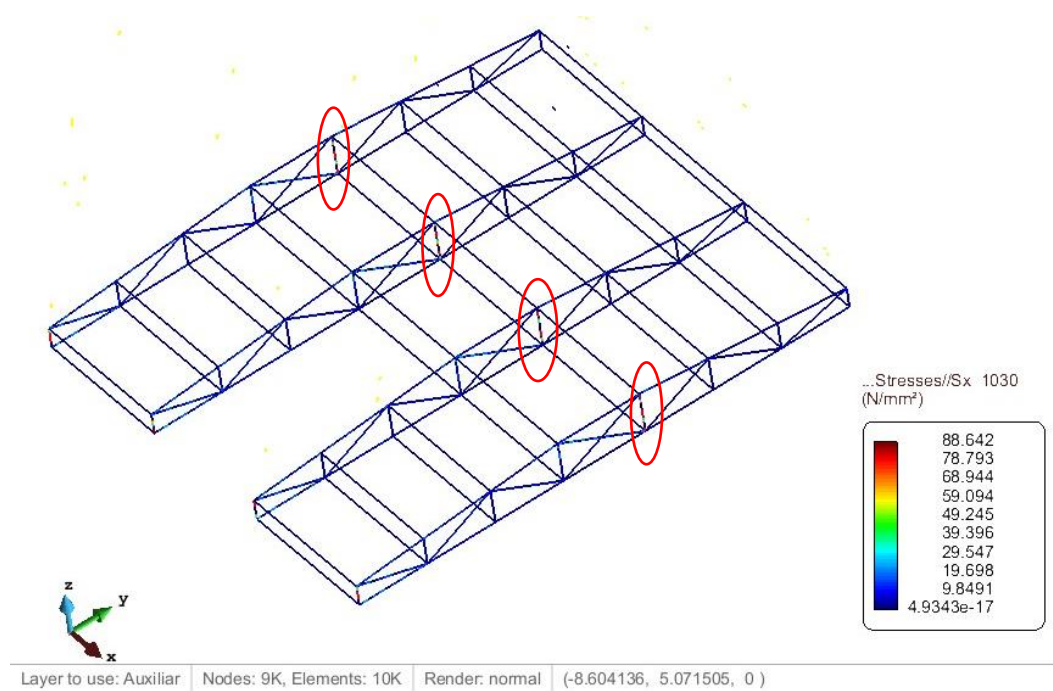


Figura 40. Tensiones en la base modelo 5

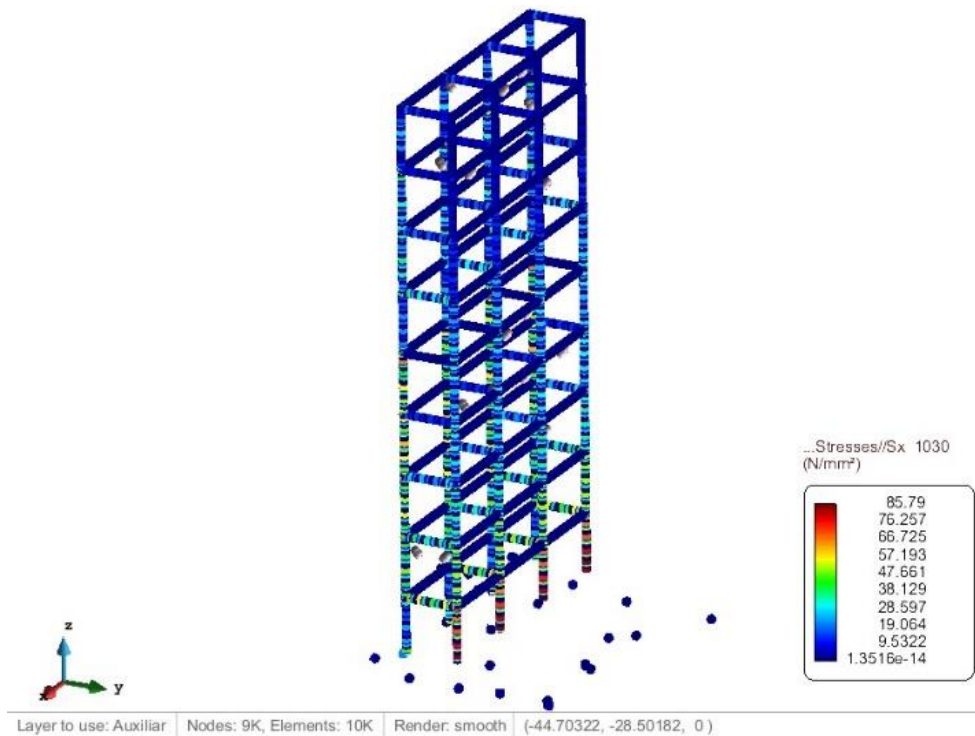


Figura 41. Tensiones en el mástil modelo 5

Las tensiones en el mástil muestran unas tensiones muy bajas respecto a la tensión máxima admisible. Pero el problema que queda por resolver es el de que el principal fallo del mástil ahora se produce por un fallo debido al pandeo. En caso de reducir más la sección se empiezan

a encontrar problemas de pandeo. Como se puede observar ver en la Figura 41 la tensión máxima del mástil es de 85 N/mm^2 , las secciones que están en la dirección x (normales a la dirección del viento) son necesarias ya que con una sección más bien pequeña se consigue reducir mucho la sección del mástil sin que pandee y ganar ligereza, pero su sección no es necesario que sea tan grande como la del mástil dejándola en solo 45-45mm y 4mm de espesor.

En lo que concierne a los desplazamientos, son muy pequeños siendo, como era previsible, máximos en la punta del mástil con apenas 5cm de distancia como se puede observar en la Figura 42:

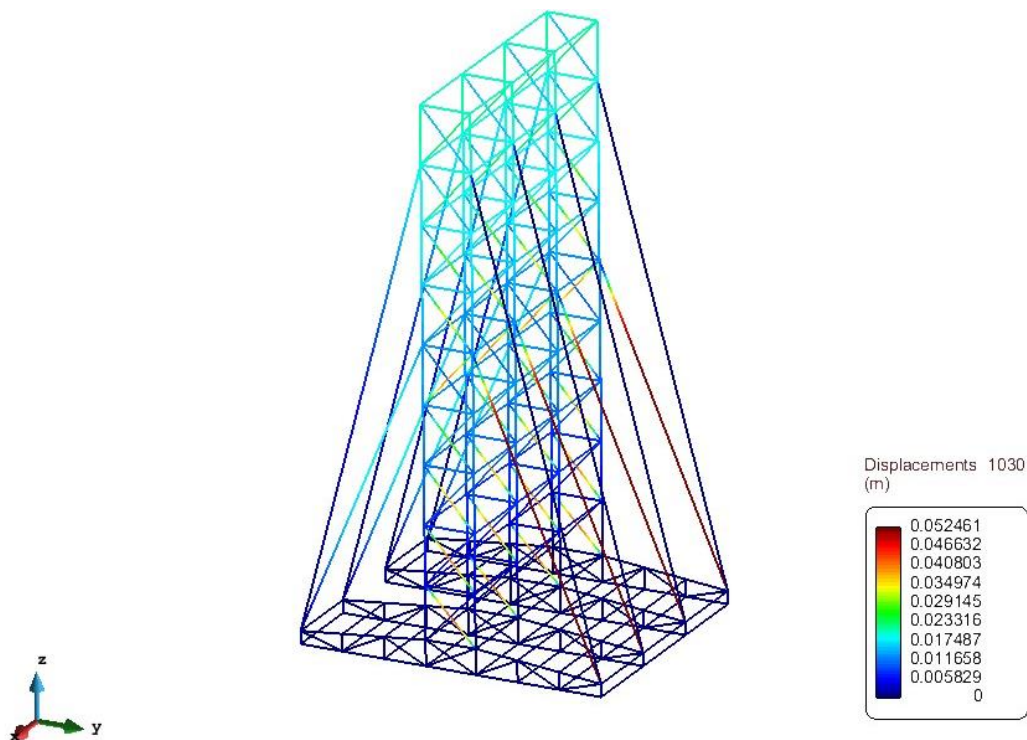


Figura 42. Desplazamientos modelo 5

Por último, las tensiones que se producen en los cables se han reducido significativamente, que tampoco compromete mucho a la estructura por lo que respecta al peso, siendo la suma del peso de todos los cables de alrededor de unos 800kg más o menos (Figura 43):

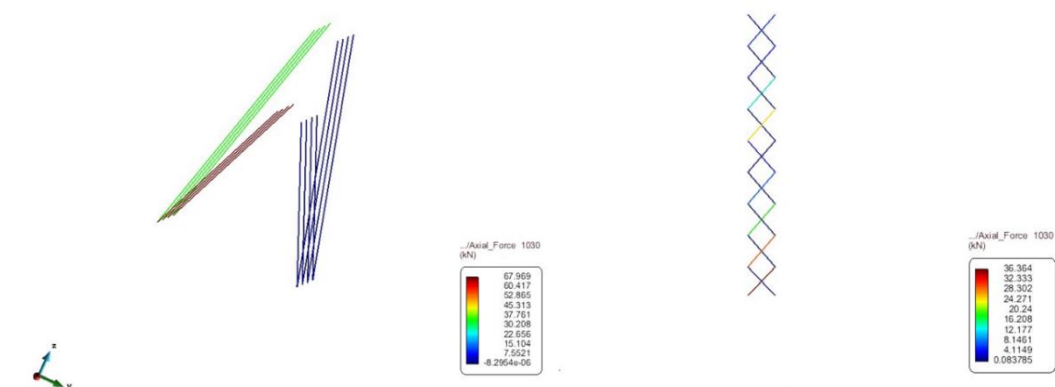


Figura 43. Tensiones cables modelo 5

Con este modelo se ha observado una grandísima mejora respecto a la solución anterior gracias a los apoyos suplementarios de la base.

Por otra parte, se observa que las tensiones en la base, así como en el mástil están concentradas. Con esto se plantea la posibilidad de hacer distintas secciones, ya sea para el mástil (superior e inferior), o en la base (secciones centrales, uniones entre estas).

En este punto ya se pasa a la solución final, en la que se dispone una membrana sobre la cual se aplicara la carga.

4.6. Resumen

Finalmente con la Tabla 7, se hace un resumen de todas las dimensiones de cada modelo con sus pesos y tensiones máximas para hacer una comparación más sencilla entre modelos.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Base	90X90X4	90X90X4	90X90X4	90X90X4	90X90X4
Mástil	120X80X6	140X100X4	120X100X4	100X80X5	100X80X5
Capa transversal	120X80X6	100X100X4	100X100X4	45X45X4	45X45X4
Capa longitudinal	-	-	-	45X45X4	45X45X4
Cables 1	Φ20	Φ20	Φ20	Φ20	Φ20
Cables 2	Φ16	Φ16	Φ16	Φ16	Φ16
Peso (toneladas)	8,3	7,3	7,2	6,8	6,8
N.º de apoyos	8	8	8	8	32
Tensión máxima base (N/mm ²)	255	286	275	263	88
Tensión máxima mástil (N/mm ²)	133	144	149	160	85

Tabla 7. Resumen dimensiones

5. SOLUCIÓN FINAL

5.1. Definición geométrica. Configuración estructural

En primer lugar se tiene un mástil de 20,5 m de altura, en el cual se dispondrán las membranas. Además tenemos un carro de 10 m de ancho por 12 de largo.

Entre mástiles, interiores y exteriores, existen unas barras con una distancia de 2m. También entre mástiles en la dirección transversal hay barras que los unen de 3,3 m.

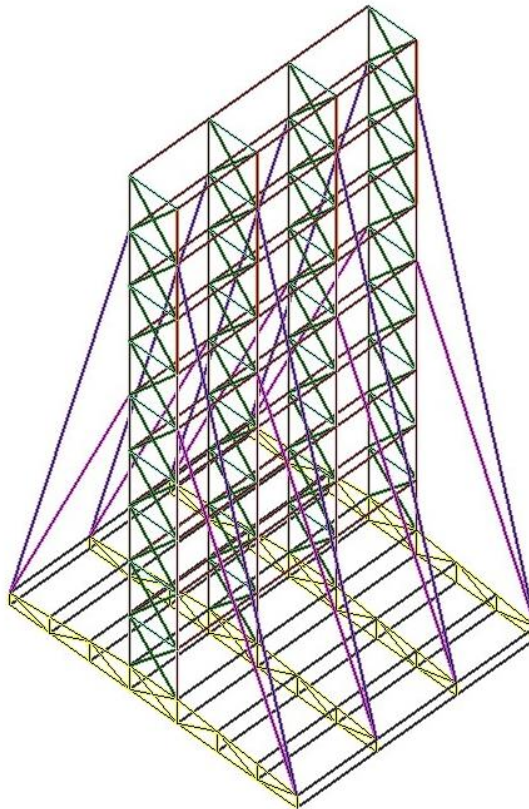


Figura 44. Descripción geométrica del modelo de la puerta final

En el carro está dividido en 2 partes. La primera parte “base” se muestra en la Figura 49. Entre base y base hay barras uniéndolas con una distancia de 3,33. Se puede observar mejor en la Figura 50. Para ahorrar en material y reducir peso se decide hacer las puntas de la base más pequeñas con 0,5 m de altura y la parte central con 1 m de altura.

Por último se disponen dos tipos de cables. En primer lugar los cables superiores anclados a una altura de 18,2 m y unos segundos cables anclados a 11,3 m. En segundo lugar los cables dispuestos en cruces de San Andrés. Esta secuencia de cables se repite cada 2,1 m. estas cruces de San Andrés se pueden ver en rojo en la Figura 51.

Para una mejor comprensión de las dimensiones se disponen la Figura 45 Figura 46 y la Figura 47.

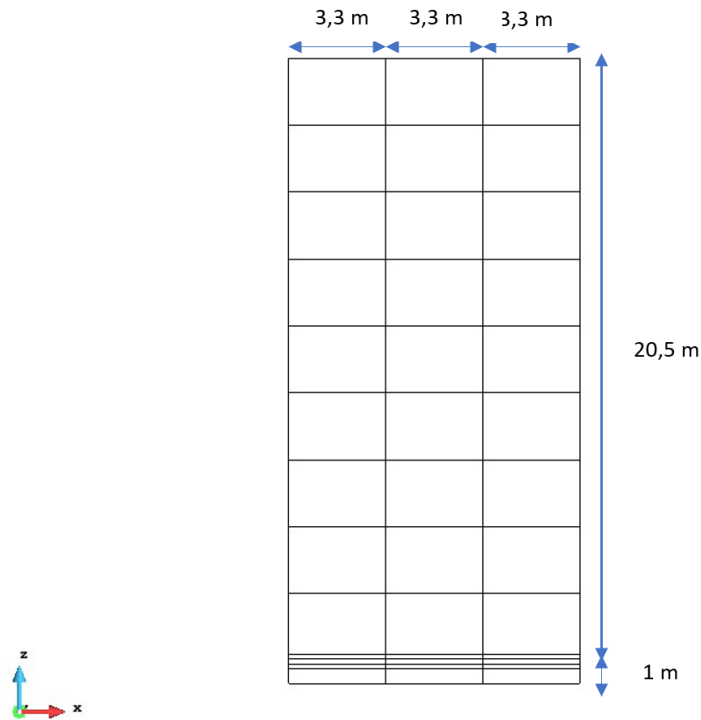


Figura 45. Esquema Z-X

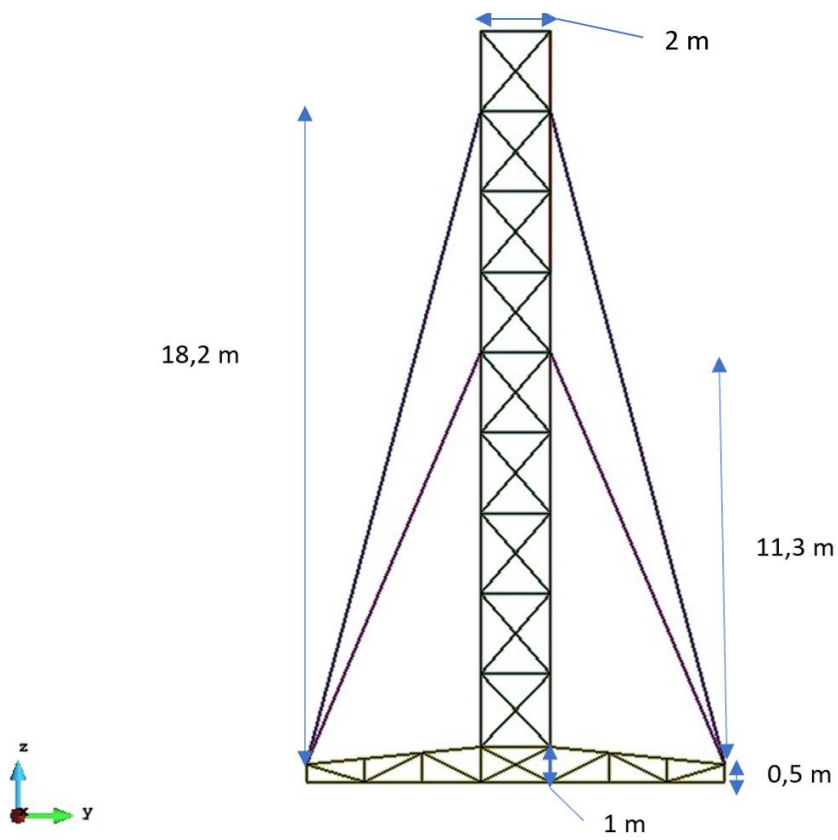


Figura 46. Esquema Z-Y

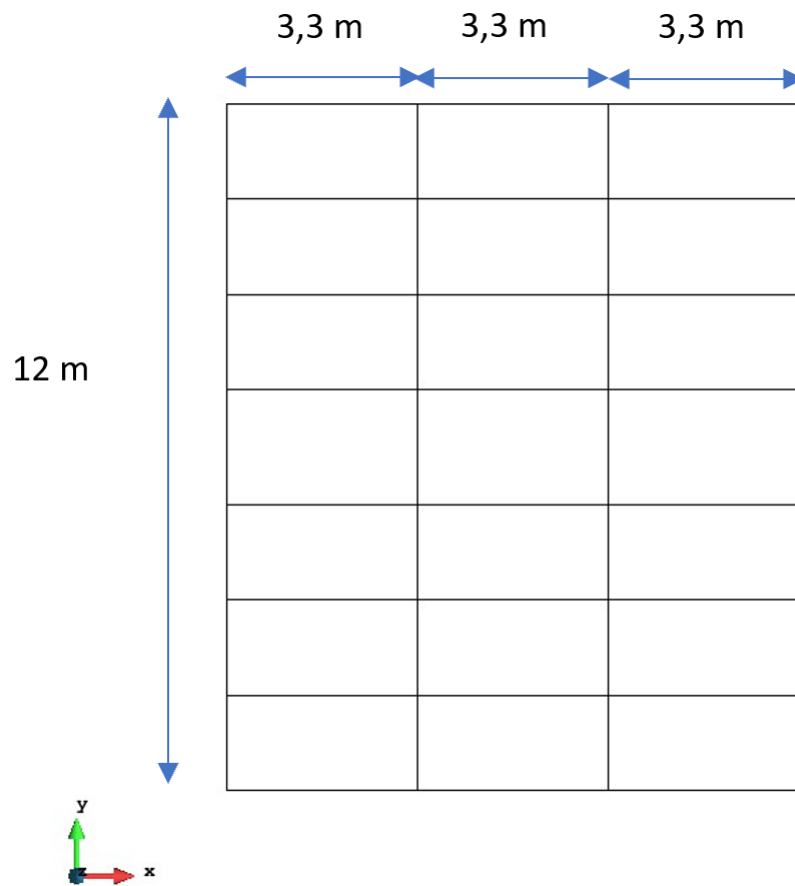


Figura 47. Esquema X-Y

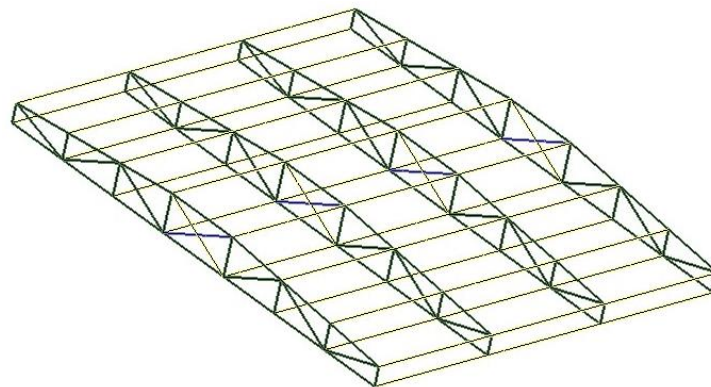


Figura 48. Carro

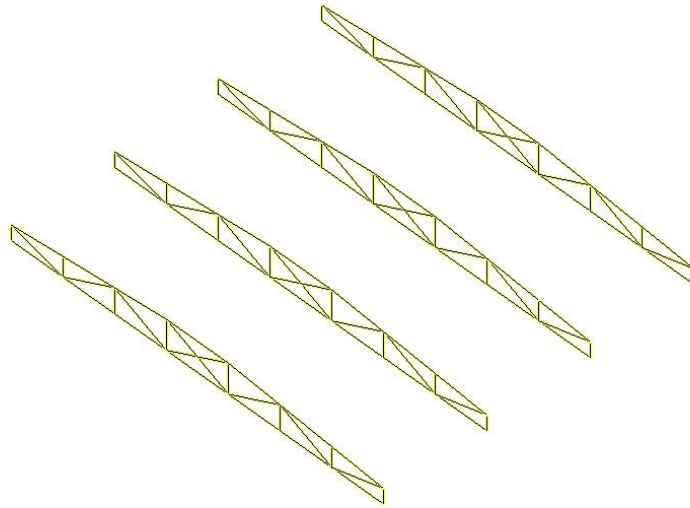


Figura 49. Base del carro

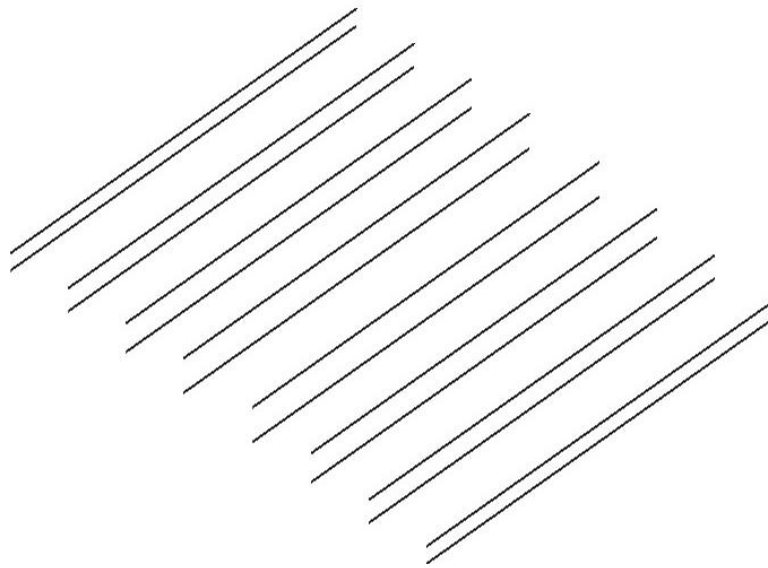


Figura 50. Uniones de las bases

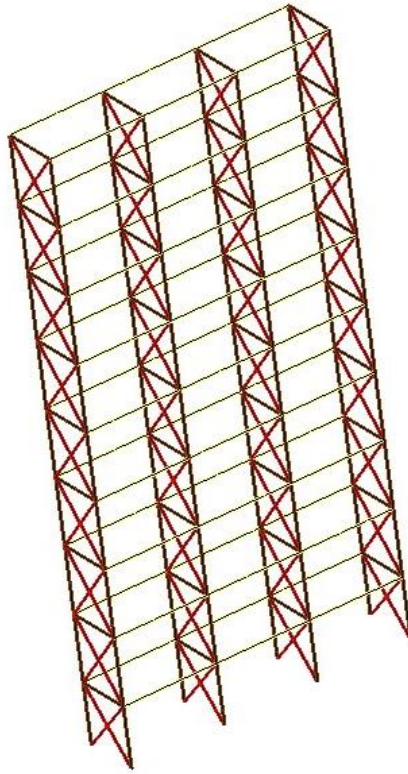


Figura 51. Mástiles nuevos

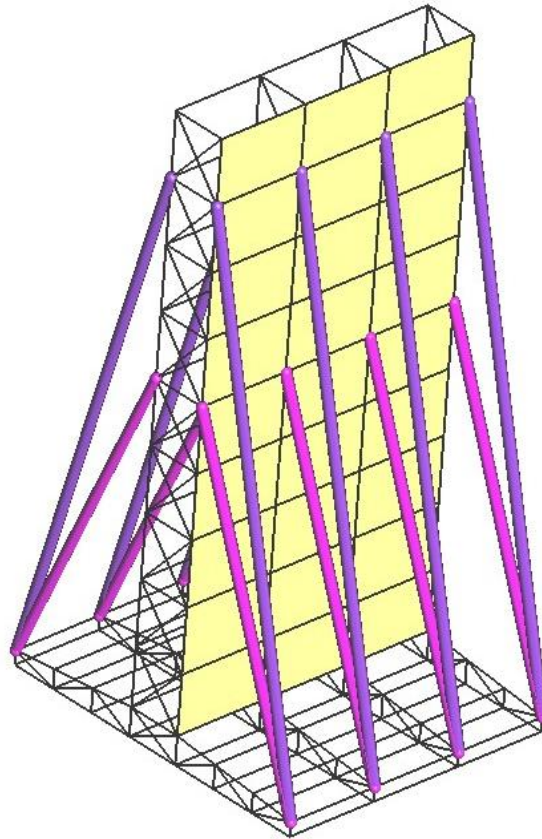


Figura 52. Disposición nueva de cables

La solución final propuesta parte de las conclusiones estructurales extraídas del proceso de diseño expuesto en el apartado anterior.

Para esta solución final se ha optado en primer lugar por disponer 16 apoyos en la base, porque se ha comprobado que además de reducir los desplazamientos en la base se reducen significativamente las tensiones de ésta.

Además se consideran dos secciones para el carro. La primera, la “base” del carro, son las secciones que se muestran en la Figura 49. Estas secciones estaban mucho más solicitadas que las barras que unían las secciones “base” entre sí, por lo que se incrementan las dimensiones en la sección cuerpo pero se bajan de manera muy importante en las uniones haciendo que el peso de la estructura se reduzca.

Por otra parte de la base suben 8 mástiles sobre los cuales se dispondrán las placas lenticulares, cambiando los tubos por estas placas. Los mástiles se dividen en la parte superior y la parte inferior. Puesto que la sección inferior del mástil está mucho más cargada que la superior se procede de igual manera que en la base incrementando la sección en la parte inferior y reduciendo la sección en la parte superior para así reducir el peso de la estructura.

Las secciones transversales son otro elemento importante de la estructura. En primer lugar las barras dispuestas en la dirección del viento aportan una mayor rigidez en este sentido haciendo en primer lugar que los desplazamientos sean menores y en segundo lugar una mayor distribución de esfuerzos entre los dos mástiles. Las secciones perpendiculares a la dirección del viento por otra parte mitigan en gran parte el problema de pandeo producido por la gran compresión a la que está sometido el mástil.

Los cables que unen los mástiles al carro aportan una mayor estabilidad y una menor deformación. (Figura 52).

También existen otros cables (cruces de San Andrés) los cuales mejoran la distribución de esfuerzos entre los dos mástiles.

Ya por último se opta por una solución sin tubos hinchables lo cual hace mucho más sencilla la operación de montaje así como las operaciones de apertura. Las características de la membrana que se va a utilizar se muestran en la Tabla 8.

Por otra parte las secciones de las diferentes partes de la estructura se encuentran en la Tabla 9.

propiedades	Ferrari 702 S2	Unidades
Peso específico	14 700	[N/m ³]
espesor	0,60	[mm]
Módulo elástico	0,38	[GPa]
Coeficiente Poison	0,30	[-]
resistencia	280	[daN/5cm]

Tabla 8. Propiedades de la membrana

PARTE	Sección	Área(cm ²)	Peso (kg)	Peso m lineal (Kg/m)	Inercia fuerte cm ⁴	Inercia débil cm ⁴
Base (solo las patas)	70X70X4	10,56	1508,11	8,28	70,4	70,4
Uniones base (unión de las patas)	40X40X3	4,44	487,76	3,48	9,01	9,01
Mástil superior (por encima del cable inferior)	70X40X4	8,16	352,17	6,40	44,3	18,3
Mástil abajo (por debajo del cable inferior)	80X60X3	8,04	687,67	6,30	68,8	44,2
capa dirección del viento (une los dos mástiles de la misma dirección)	45X45X4	6,56	370,62	5,14	15,9	15,9
Capa dirección perpendicular al viento (une los mástiles 4 en una dirección)	40X40X4	10,3	813,57	4,51	10,5	10,5
Cables	20	3,14	633,55	2,46	-	-
Cruz de san Andrés	16	2,01	343,94	1,5	-	-

Tabla 9. Secciones puerta final

Siendo el peso total final aproximado de **5197,42** kg. A lo que habría que sumar tornillería, que puede elevar esta cifra.

5.2. Definición del modelo numérico

El cerramiento delantero del hangar se ha modelado numéricamente empleando el método de los elementos finitos diferenciando los distintos elementos estructurales mencionados en el apartado anterior.

Las barras se han modelado mediante elementos finitos unidimensionales o *beam* lineales que unidos mediante nudos rígidos transmiten todos los esfuerzos de axil, cortante, flector y torsor. Los cables se han modelado mediante elementos finitos unidimensionales o *truss* lineales que transmiten únicamente esfuerzo axial de tracción. Las membranas por su parte se han modelado mediante elementos finitos triangulares lineales tipo *membranes*. En la Figura 53 se muestra el modelo numérico definido para el cerramiento delantero en el que se aprecian los elementos estructurales descritos.

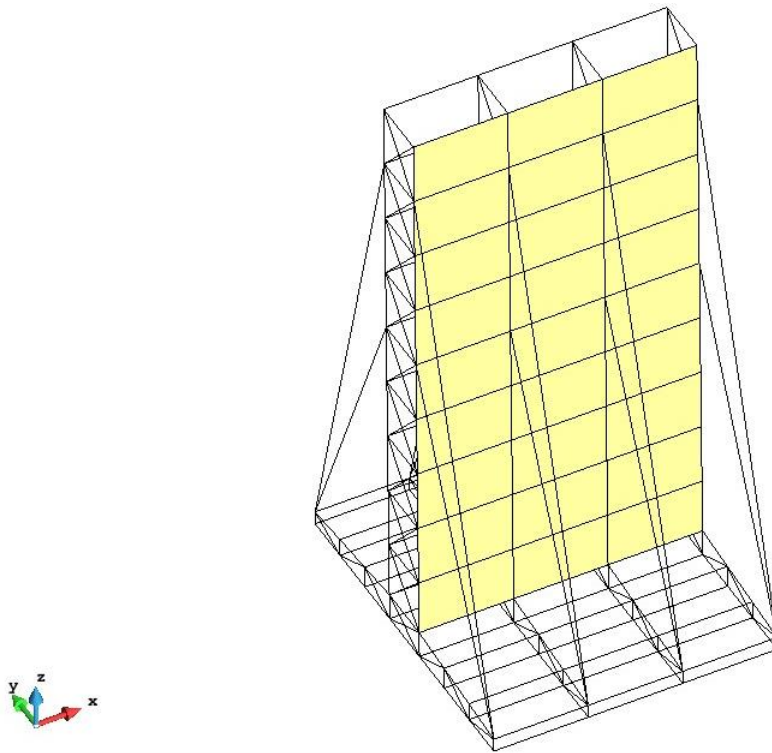


Figura 53. Modelo numérico del cerramiento delantero. Geometría

Debido a la simetría del problema en cuanto a geometría y disposición de los elementos estructurales, el modelo considera únicamente una superficie de exposición del viento (en amarillo en la Figura 53).

Las cargas están aplicadas sobre la membrana en dirección normal a esta como se puede observar en la Figura 55. Esta carga es de 937 Pa.

Las condiciones de contorno por otra parte, están constreñidos en la dirección x,y,z pero permitiendo el giro en esos puntos. Existe un total de 16 apoyos distribuidos en los contornos del carro y en la parte central. El esquema de los apoyos se puede observar en la Figura 54 como puntos negros.

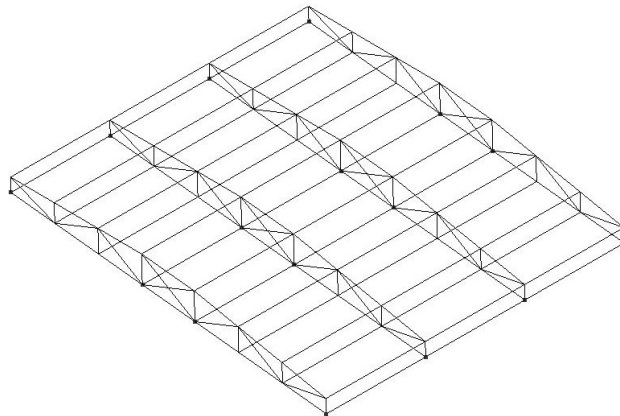


Figura 54. Apoyos del carro

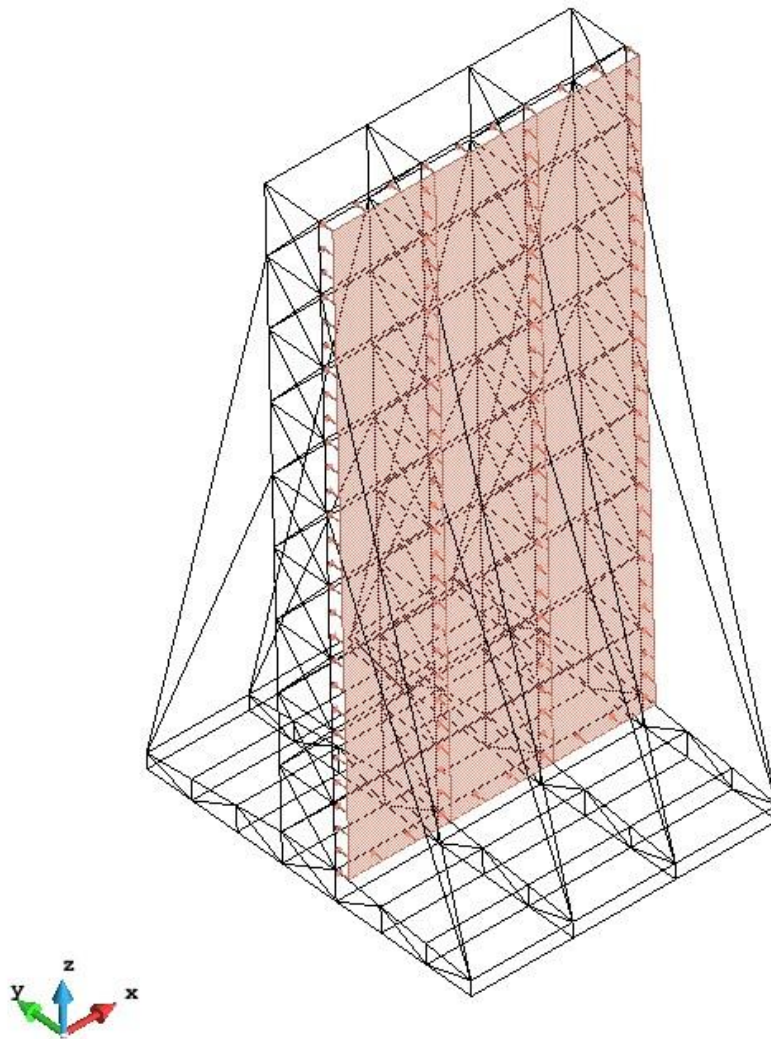


Figura 55. Cargas sobre la membrana

El modelo numérico está compuesto por 11694 triángulos lineales en la membrana y 14770 elementos lineales unidimensionales para las barras y cables. Los elementos están definidos por 8386 nodos con 3 grados de libertad cada uno. La Figura 56, muestra la malla de elementos finitos empleada en el modelo numérico.

La simulación numérica de la puerta delantera del hangar se ha calculado como un problema geoméricamente NO-LINEAL, debido a los grandes desplazamientos que se potencialmente se producen, sobre todo en la membrana y en los cables. La solución del problema implica un procedimiento iterativo de predicción-corrección basado en el control incremental de cargas, de uso habitual en problemas estructurales.

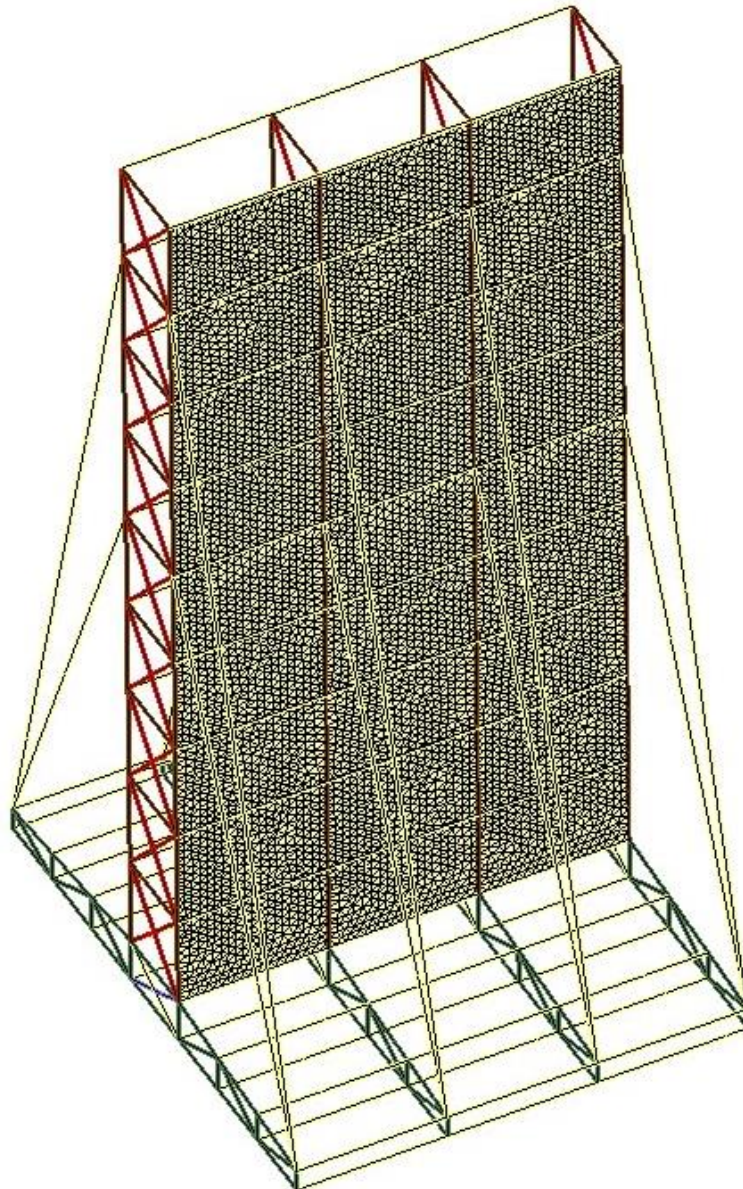


Figura 56. Modelo numérico del cerramiento delantero. Malla de elementos finitos

5.3. Análisis estructural

5.3.1. Análisis mástil

La distribución de las tensiones normales en el modelo está representada en la Figura 57. Las tensiones máximas se producen en el mástil, en la sección de unión entre los mástiles externos y las barras transversales, alcanzando un valor de 323 N/mm^2 . Esta tensión máxima se produce a una altura de 12,3 m de altura desde el suelo. Otro punto relevante es la unión entre los mástiles y la base. En esta parte de la estructura se observa que las tensiones son muy reducidas en comparación a la máxima producida en el mástil con un valor de 107 N/mm^2 . La Figura 58 muestra un detalle de dichas tensiones.

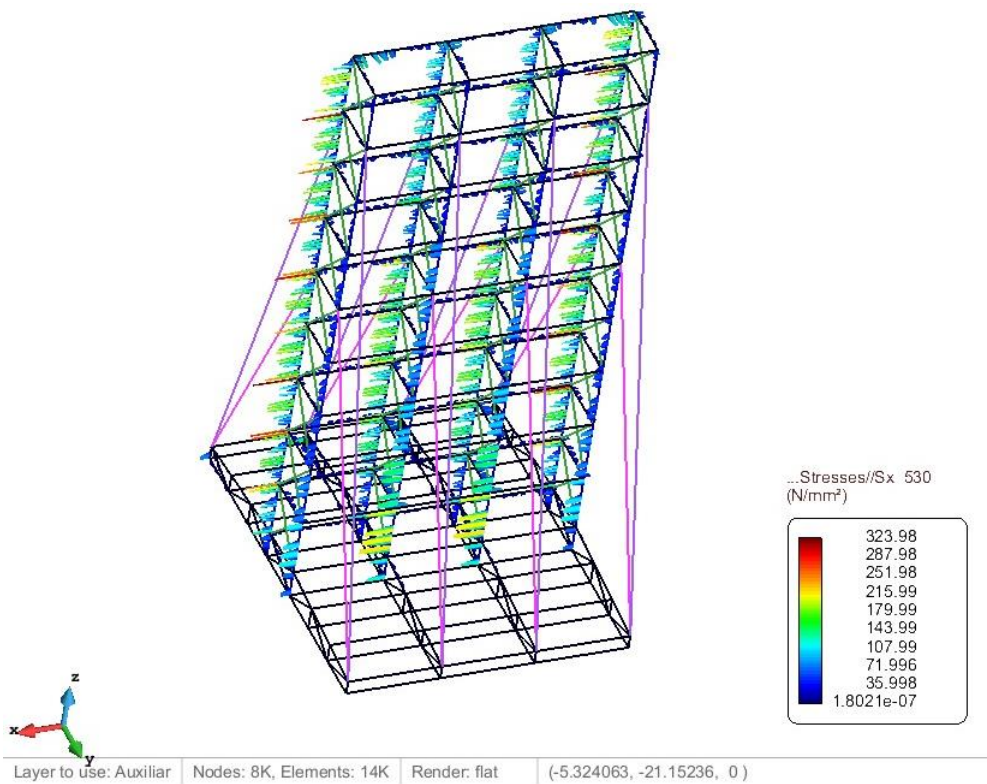


Figura 57. Tensiones puerta final

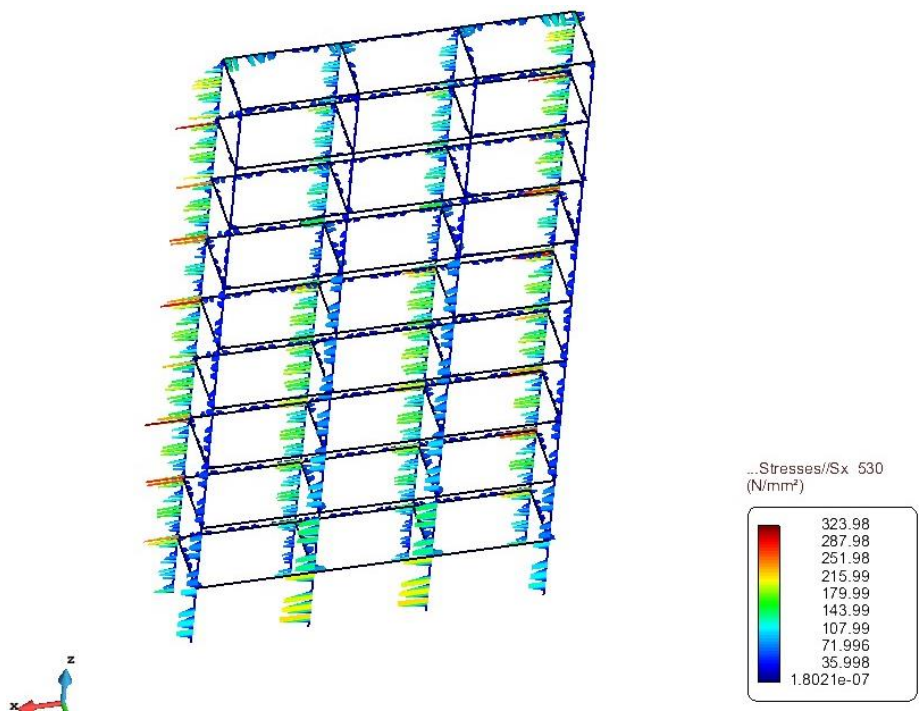


Figura 58. Tensiones mástil final

La tensión normal máxima es de 323 MPa. El acero utilizado es un s355. Para un coeficiente reductor del acero de $\gamma=1.05$, la tensión admisible de diseño resulta en 338 MPa lo que significa que los mástiles cumplen el criterio de resistencia.

Constatar finalmente que las secciones transversales perpendiculares a la dirección del viento reciben ahora carga directa de las membranas por lo que por la carga aplicada estará más distribuida entre el mástil y dichas barras. Esto ocasiona en todo caso, que las secciones transversales normales al viento estarán ahora sometidas a una tensión mayor como era de esperar.

5.3.2. Análisis carro (base)

Según lo expuesto en la definición de la estructura, el carro consta de dos partes:

- En primer lugar, las “patas” que consisten en el entramado de celosía, en la misma dirección en la que se aplica la carga. En esta sección es en la que se concentran la mayor parte de las tensiones. Puesto que es la sección que más sufre se la ha reforzado poniendo una sección tubular mayor de 70X70X4 mm.
- En segundo lugar, se tiene las secciones que unen este entramado de celosía. En esta parte las tensiones son más bien mínimas, por eso motivo se le ha podido reducir la sección considerablemente. Esta sección es de 40X40X3 mm.

Las tensiones normales se pueden ver en la Figura 59.

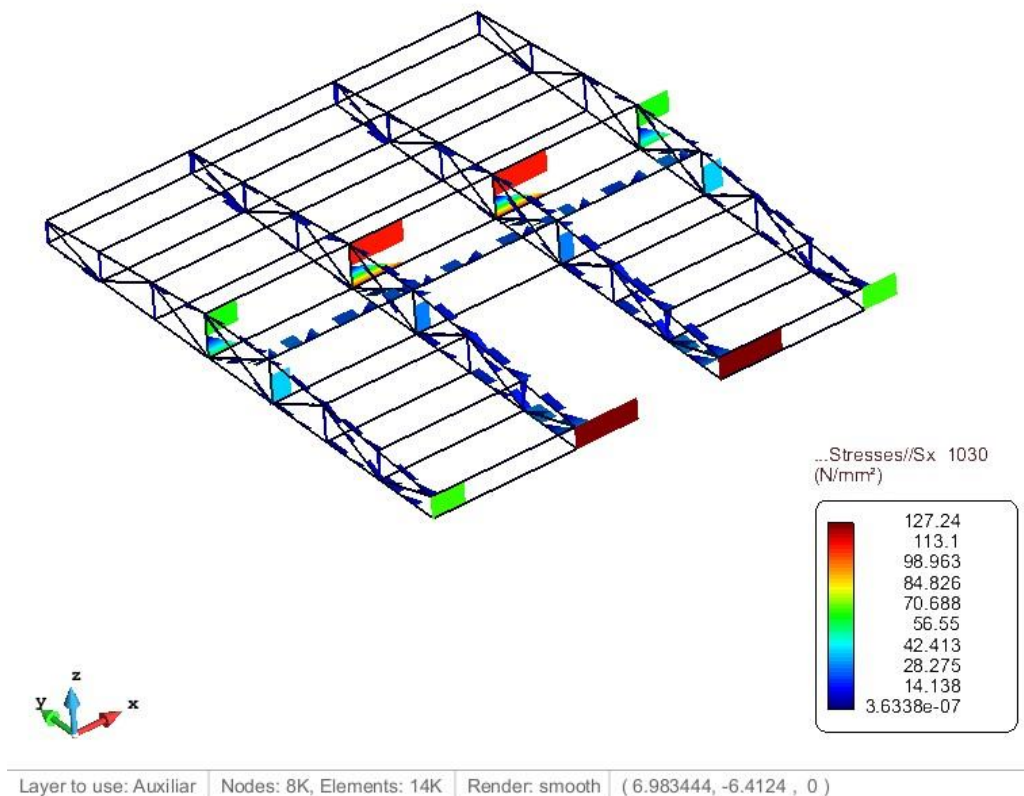


Figura 59. Distribución de tensiones normales en el carro

En la Figura 60, se puede ver con mayor detalle las tensiones que se producen en la base teniendo una tensión máxima de 143 N/mm^2 .

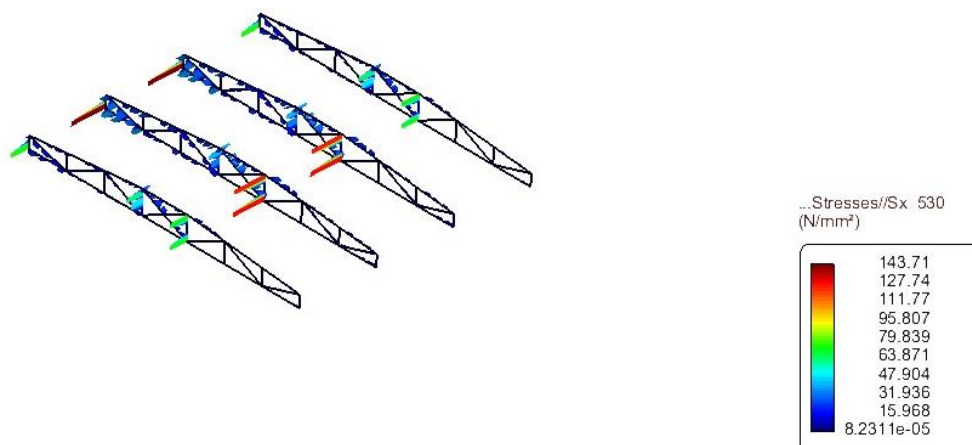


Figura 60. Distribución de tensiones normales en el carro (Base)

Por otra parte en la Figura 61, se puede observar que la tensión máxima en estas secciones es de 32 N/mm^2 . Debido a los requisitos especificados en el apartado 3.1 de facilitar en la medida de lo posible la construcción de la puerta, no se hacen distintas secciones para esta parte de la base.

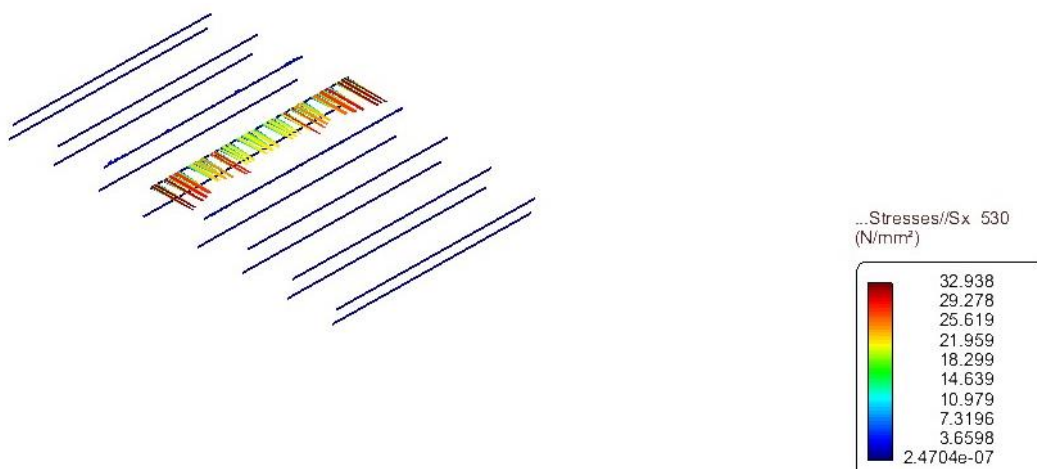


Figura 61. Distribución de tensiones normales en el carro (Uniones)

5.3.3. Análisis en los cables

Para la estabilidad de la puerta es preciso el uso de cables anclados entre el mástil y la base. Estos cables, además, también ayudan a reducir considerablemente los desplazamientos sobre todo en el mástil. Este modelo cumple con los requisitos que se le pedían a la puerta, evitando tener que conectar ningún cable al suelo.

Por último los axiles máximos que se presentan en los cables que soportan el mástil son de 103 kN (Figura 62) y 53 kN en los cables que se encuentran en mástiles interiores (Figura 63).

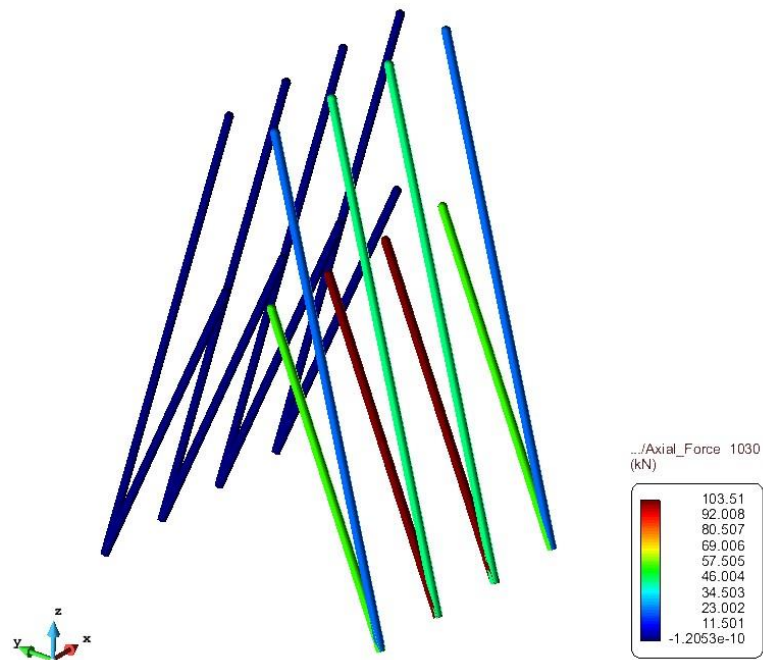


Figura 62. Axiles en los cables del base-mástil disposición final

Estos cables (cruz de san Andrés) nos permiten transmitir mejor los esfuerzos entre los dos mástiles y así descargar el mástil que más tensiones tenga. Los cables situados entre los mástiles a modo de cruz de San Andrés, permiten transmitir mejor los esfuerzos entre los dos mástiles y así descargar el mástil que más tensiones tenga. El valor máximo se produce en la parte inferior con 50,22 kN.

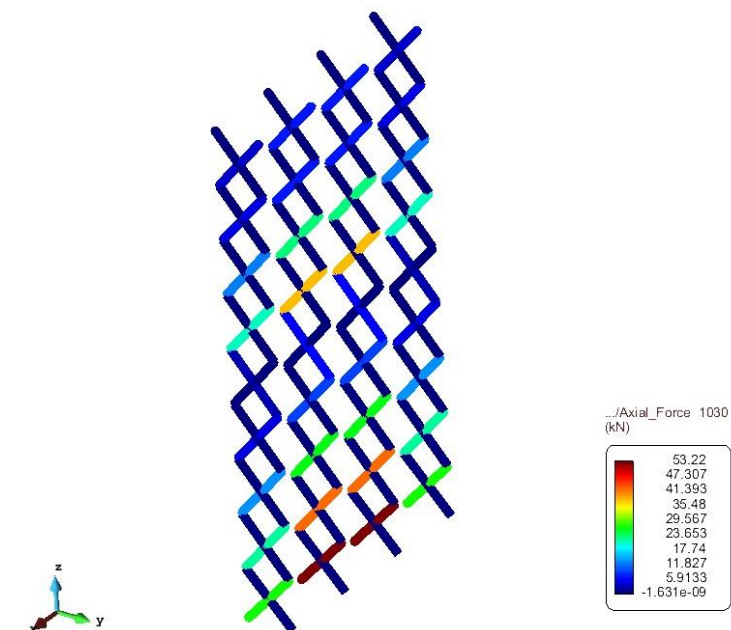


Figura 63. Axiles en los cables mástil interior disposición final

5.3.4. Análisis de las membranas

Las membranas están sujetas a lo largo de todo el mástil. Es importante disponer unas membranas lo suficientemente resistentes como para que no se rajen o se deformen demasiado.

Sobre las membranas se aplican las cargas de viento de 937 Pa. Esto produce unas tensiones máximas principales en las membranas de 20 kN/m, como se puede apreciar en la Figura 64.

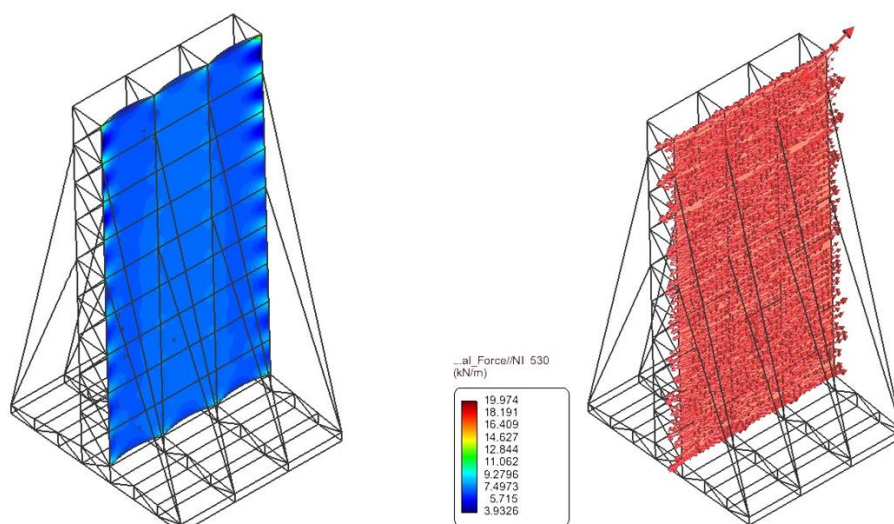


Figura 64. Tensiones 1 en la membrana

Por otra parte se producen unas tensiones mínimas en la dirección y de 3,4 kN/m, como se puede observar en la Figura 65.

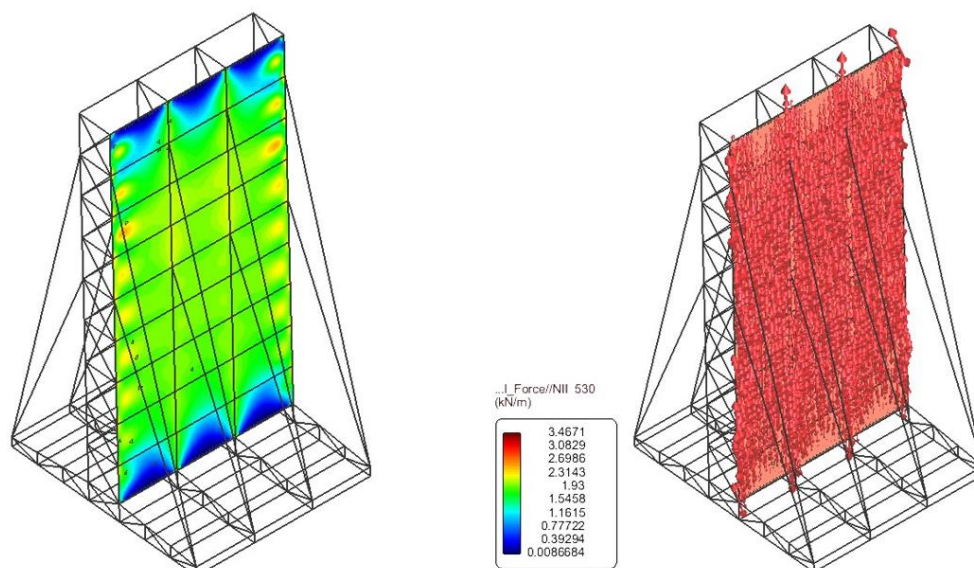


Figura 65. Tensiones 2 en la membrana

Estos valores no exceden la tensión máxima de la membrana de 56 kN/m.

Por último los desplazamientos en la membrana son importantes ya que un exceso de desplazamiento podría dañar la estructura o la propia membrana. El desplazamiento máximo que se observa en Figura 66, es de 32 cm.

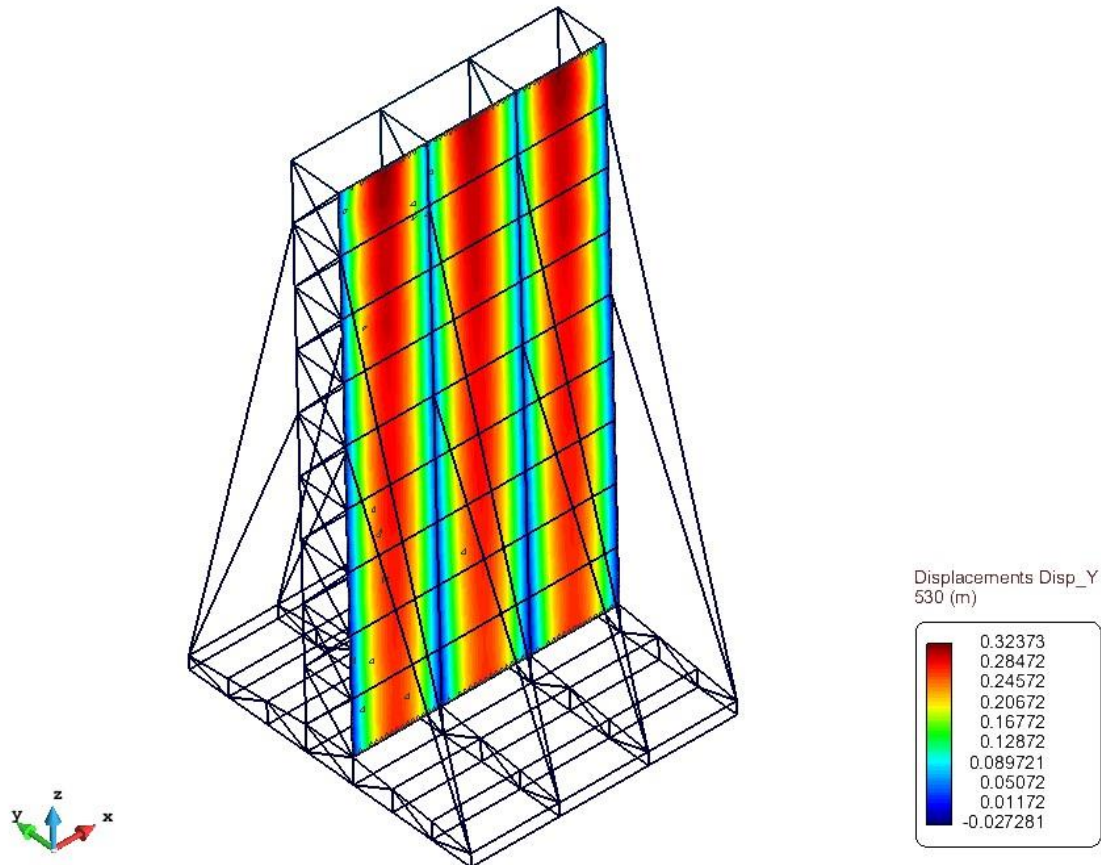


Figura 66. Desplazamientos en la membrana

5.3.5. Desplazamientos

Por lo que respecta a los desplazamientos se observa que son máximos en la punta de los mástiles interiores con un valor de 4 cm como se puede ver en la Figura 67.

Estos valores son muy inferiores a los valores de desplazamientos en la punta que se tienen actualmente.

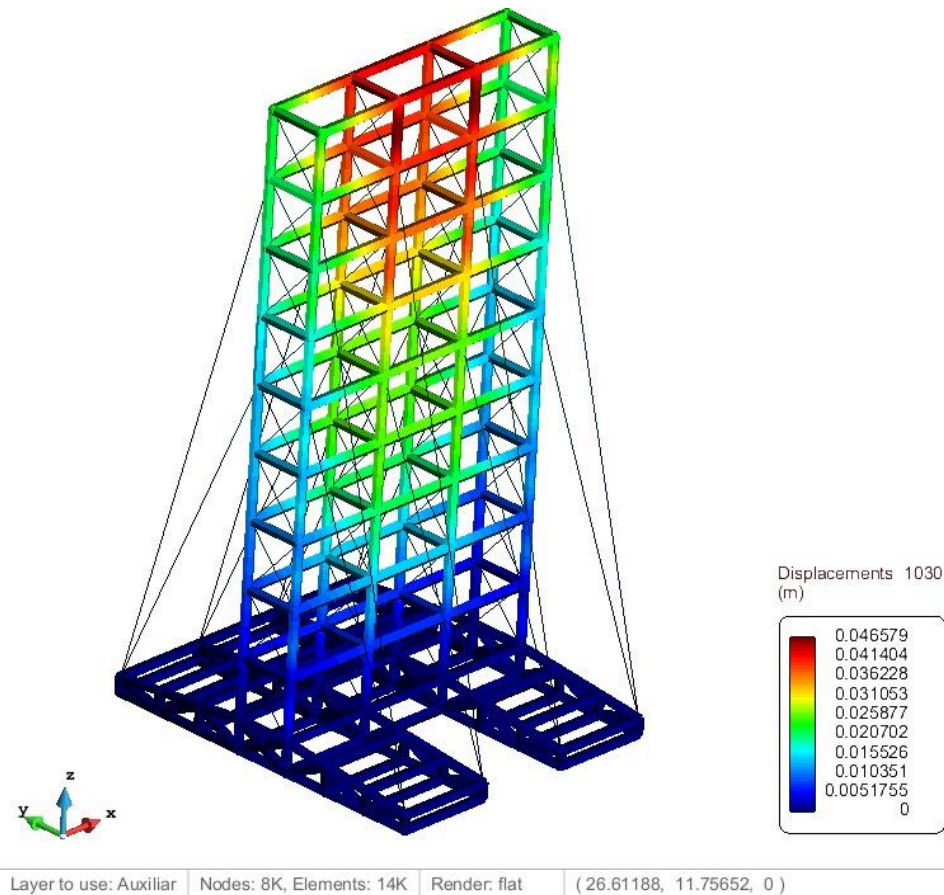


Figura 67. Desplazamientos en el cerramiento delantero

5.3.6. Reacciones

Por lo que hacen las reacciones se observa una reacción máxima de 153 kN sobre la losa, pero una reacción negativa de 145 kN que tiran del carro en los extremos de este. (Figura 68).

El único problema que surge de estas reacciones son los resultados negativos o fuerzas que van hacia abajo. El problema reside en el sistema de sujeción de este carro a la losa, puesto que se debería atar a la losa de alguna forma, lo cual podría entorpecer las maniobras de apertura y cierre.

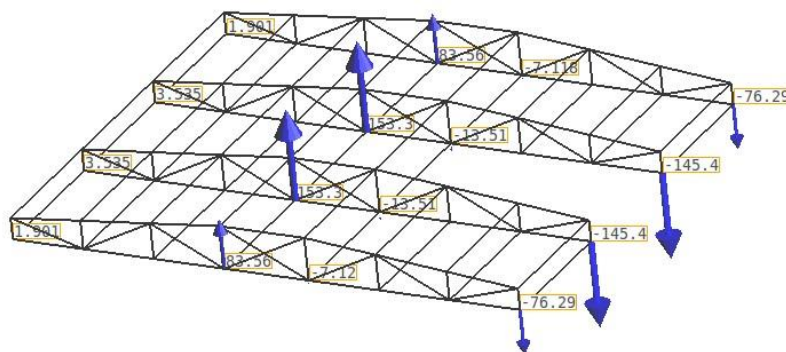


Figura 68. Reacciones base final

5.4. Estudio de estabilidad

Para las comprobaciones de estabilidad se consideran 3 posibles escenarios: un primer escenario que supone el transporte, durante el cual la estructura puede deslizar o volcar, y un segundo escenario, una vez estacionada la puerta donde se deberá verificar el deslizamiento.

En la Figura 69, se puede ver un esquema de las fuerzas actuantes para los cálculos de estabilidad.

El peso de la estructura es $W = 50,96 \text{ kN}$ y favorece a la estabilidad del conjunto.

El viento por otra parte es una acción desestabilizadora. Esta acción depende en gran medida del área de exposición a la que presenta la puerta, que a su vez depende del área de las placas lenticulares hinchables. Así pues, el área de exposición de las placas es de:

$$Area = 10 \cdot 20,5 = 205 \text{ m}^2$$

El punto respecto al cual rota sería la rueda, que está a 4,35 m del centro del carro, y será el punto respecto al cual se harán los cálculos preceptivos.

Las operaciones de apertura y cierre, deben ser operaciones bajo circunstancias controladas de viento. Las operaciones de apertura y cierre están limitadas por una presión de viento máxima que se traduce en una velocidad de viento máxima.

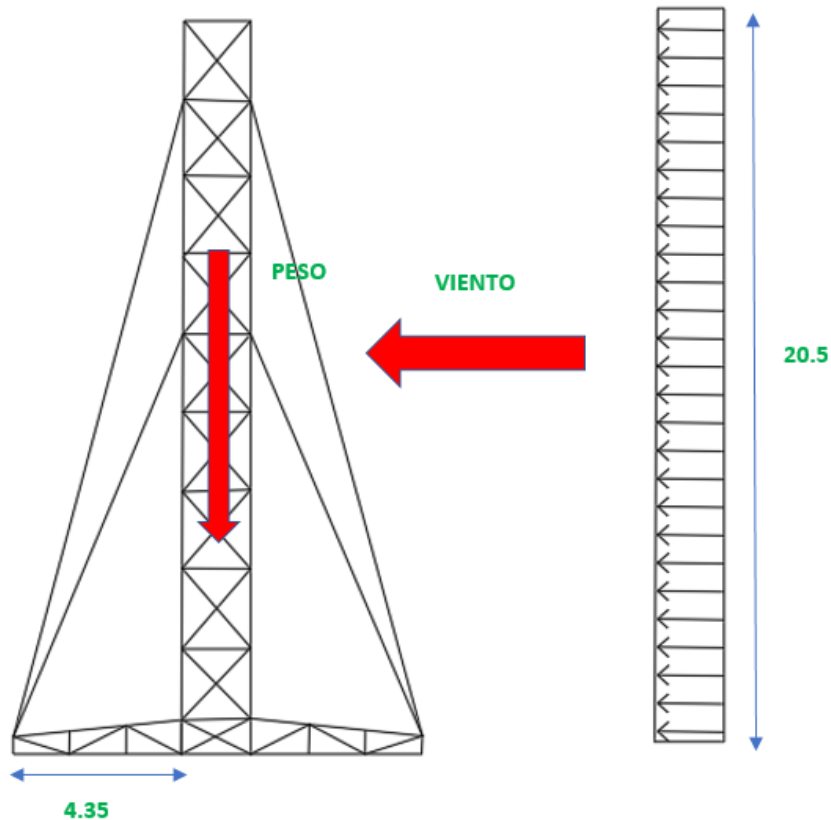


Figura 69 Esquema fuerzas actuantes en la verificación frente a estabilidad

La relación entre la presión sobre la membrana y la velocidad del viento es la siguiente ecuación:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot (v_m)^2 \cdot C_e$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire establecida en 1,25 Kg/m³ y C_e el coeficiente de exposición valorado en 1,864. En consecuencia, la velocidad del viento puede calcularse como:

$$v_m = \sqrt{\frac{2 \cdot q_b}{C_e \cdot \rho_{aire}}}$$

5.4.1. *Análisis del riesgo de deslizamiento*

De acuerdo con la normativa establecida, se ha de verificar que las fuerzas estabilizadoras han de ser superiores a las desestabilizadoras usando un coeficiente de seguridad.

$$\mu \sum_i \gamma_i N_i \geq \sum_j \gamma_j H_j$$

- γ_i es el primer coeficiente de seguridad, para las fuerzas estabilizadoras. El valor para este coeficiente de seguridad es de 1. Este coeficiente afectaría al peso.
- γ_j correspondría al coeficiente de seguridad para las fuerzas desestabilizadoras. El valor es de 1.5 que le corresponde afecta al viento.
- μ es el valor de coeficiente de fricción.

En este punto son considerados dos escenarios para la verificación del riesgo de deslizamiento de la puerta:

- En primer lugar, se tiene la operación de transporte de los carros desde el hangar hasta su posición “estática”
- La posición “estática” en la que espera el carro hasta que la aeronave ha entrado.

5.4.2. *Análisis de estabilidad al vuelco*

Para la estabilidad al vuelco se consideran como acciones principales, el peso, como acción estabilizadora, y como acción desestabilizadora el viento.

Se considerará que la superficie de exposición en este caso es la totalidad del área abarcada por la membrana completamente desplegada como si estuviera en servicio.

Para hallar las velocidades máximas para asegurar la estabilidad el problema se puede plantear como un problema de equilibrio de momentos, donde el momento estabilizador debe ser mayor al desestabilizador.

$$\sum_i \gamma_e M_e \geq \sum_j \gamma_d M_d$$

En este caso los factores de seguridad γ_e y γ_d tienen valores de 1 y 1.2 respectivamente.

La velocidad máxima que se obtiene a partir de la condición de vuelco es de 29,8 Km/h.

5.4.3. Análisis de estabilidad al deslizamiento

El transporte se lleva a cabo con un toro mecánico. A diferencia de la puerta actual el toro ahora solo llevara 1 carro por cada operación hasta depositarlo en la zona de estacionamiento. Como se ha dicho en la introducción del apartado 5.4, la estabilidad depende en gran medida del área de exposición de la puerta que eran 205 m².

Los carros son transportados por toros y gracias a las ruedas que tienen debajo del carro, permitiendo al toro tirar de él. Hay que puntualizar que para el cálculo de estabilidad se tiene en cuenta que el toro pesa 7 toneladas.

Otro factor importante para la estabilidad al deslizamiento es el coeficiente de fricción. Este factor depende del contacto de la rueda del toro y el carro contra el suelo. Este coeficiente es cambiante según en la situación en la que se encuentra, ya sea que el suelo este mojado o no, y de si el carro está en movimiento o no.

Para el cálculo de la estabilidad al deslizamiento se utilizará la siguiente expresión

$$\gamma_i \mu W_t \geq \gamma_j q 2 S_{viento} \rightarrow q \leq \frac{\gamma_i \mu W_t}{\gamma_j S_{viento}}$$

Dada la expresión, se pueden obtener las velocidades a las que se puede proceder a las operaciones de apertura y cierre en términos de la velocidad del viento siendo los valores determinados en la Tabla 10.

Coeficiente de fricción (μ)		Velocidades máximas de operaciones (km/h)
Estático-seco	1,00	47,9
Estático-mojado	0,30	26,2
Dinámico-seco	0,80	42,9
Dinámico-mojado	0,25	23,9

Tabla 10. Velocidades máximas operativas

5.5. Sistemas de reducción de exposición al viento

En los procesos de apertura y cierre de la puerta un factor limitante para que se pueda proceder a la operación es la velocidad del viento. Esta velocidad está asociada a una superficie de exposición.

Reduciendo la superficie de exposición se podría incrementar las velocidades máximas de viento para proceder a la apertura. Se estudia, entonces, la posibilidad de implementar un sistema para reducir esta exposición al viento. Para este problema se han estudiado dos tipos de soluciones;

Entre los sistemas estudiados se plantea la solución de dividir la membrana por la mitad haciendo que la velocidad máxima de apertura sea superior, puesto que la idea es parecida a la de poner una cremallera que divida la membrana por la mitad dejando pasar el viento tal como se muestra en la Figura 70. Este sistema consiste en un sistema similar al de atado de un zapato. Este sistema cuenta con una cuerda (en rojo, Figura 70) que pasa por unas anillas. En caso de querer abrir la membrana se destensa el cable/cuerda que pasa por estas anillas haciendo que la membrana se abra.

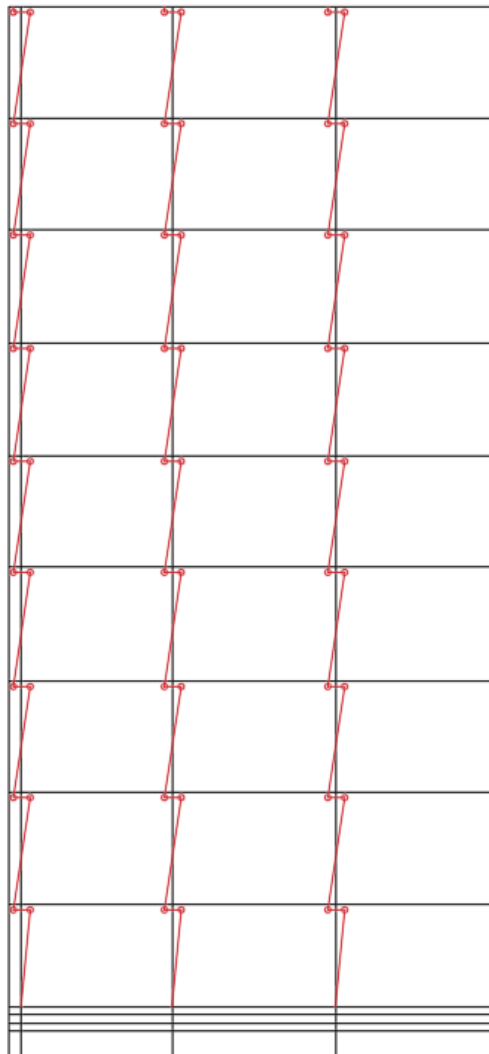


Figura 70. Esquema sistema de cremallera

Por otra parte, se plante otra posibilidad más sofisticada pero más cara. Esta solución consiste en un sistema ya homologado y estandarizado, por la empresa Megadoor® con lo cual se reduce prácticamente al completo la superficie de exposición.

El problema principal de esta solución es la sofisticación de la misma, con lo que eso conlleva de una implementación más compleja durante la construcción. Además, las cimentaciones de la estructura deberían ser mucho más grandes teniendo en cuenta las dimensiones de la parte frontal. Esta solución podría ser viable en un hangar más pequeño.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras el desarrollo de este trabajo se concluye que el modelo que se tiene el resultado final del apartado 5, cumple una serie de requisitos estructurales y de operatividad esperados para la nueva estructura de cerramiento para hangares inflables.

Se tiene una baja interacción del elemento con la losa sin ningún cable anclado a esta, además de una mejora en los tiempos de apertura y cierre de la puerta como resultado de la baja interacción losa-estructura sin olvidar de que la puerta cumple con la estabilidad estructural con un mínimo peso.

Se ha de recalcar que las tensiones máximas de la estructura se producen en la base y en el mástil teniendo unos máximos de 143 y 323 N/m² sin sobrepasar las tensiones máximas a las cuales el material utilizado empieza a plastificar.

Por otra parte los desplazamientos máximos también entran dentro de lo razonable siendo inferiores a los del anterior modelo y teniendo un máximo en la punta del mástil de 5cm.

Además de mejorarse los tiempos de apertura y cierre también se cumplen unas velocidades de viento máximas a las que se puede operar teniendo como valor crítico de velocidad en una situación en movimiento con el pavimento mojado de 23,5 km/h.

Además, gracias a este nuevo sistema de aislamiento de la puerta, a base de membranas permite plantear la solución de una reducción de exposición al viento a base de cremalleras especificados en el apartado 5.6 que permiten aumentar la velocidad límite de operación en caso de que fuese necesario, factor que incrementa notablemente las prestaciones del producto.

La nueva puerta diseñada aún tiene margen de mejora en otros ámbitos como podría ser la cuestión del número y la tipología de los apoyos, si ruedas u otro sistema similar, así como otros sistemas diferentes de apertura de la puerta como podría ser el sistema que ofrece Megadoor® especificado anteriormente o un sistema de railes, sistema con el cual se podría desestimar el uso de los toros haciendo de la operación de apertura y cierre una operación mucho más rápida, sencilla y segura.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Oñate E.(1995)“Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análisis estático lineal”. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Barcelona, España
2. Zienkiewicz O. and Taylor R.(1989).“The finite element method”. McGraw-Hill,Voll y II.
3. Norma UNE-EN-1991-1-4 “Acciones en las estructuras, acciones generales, acciones de vientos”
4. Norma UNE-EN 13782 “Estructuras temporales, carpas, seguridad”.